



Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Hornicko-geologická fakulta

Disertační práce doktorského studia

na téma

Modelování proudění plynu ve skládce

Studijní program: 2101V Nerostné suroviny

Studijní obor: 3912 – 9 Automatizace technologických procesů

Školitel: prof. Ing. Vladimír Strakoš, DrSc.

Doktorand: Ing. Josef Pončík

Ostrava, srpen 2009

Disertační práce - Modelování proudění plynu ve skládce

Školitel: prof. Ing. Vladimír Strakoš, DrSc.

Doktorand: Ing. Josef Pončík

Anotace

Disertační práce se zabývá fyzikálními a chemickými ději na skládkách komunálních odpadů, kde dochází k vývinu skládkového plynu, který musí být odváděn, jinak má nežádoucí vliv na okolní prostředí, a také může dojít k výbuchu. Pozornost je soustředěna na možnosti simulace těchto dějů a využití získaných informací.

Náplní disertační práce je vytvoření simulačního modelu, který fyzikální a chemické děje na skládce simuluje a umožní je tímto způsobem sledovat. Tento model se skládá z matematického modelu vývinu skládkového plynu a jeho proudění tělesem skládky a z algoritmů pro řízení odsávání plynu na skládce tak, aby se dalo odsávaný skládkový plyn dále účelně využít. Pro simulaci je využita metoda konečných objemů, dělící skládku na diskrétní konečné objemy. Model je zpracován do formy aplikace, která umožňuje provádět experimenty s různými vstupními daty a získávat důležitá výstupní data v různých podobách, včetně grafů historie parametrů odsávaného plynu. Na modelu jsou provedeny experimenty s různými vstupními parametry a s využitím rozdílných možností nastavení a ovládání simulace. V rámci disertační práce jsou uvedeny závěry z experimentů.

Klíčová slova: Odpad
Skládka odpadů
Odpadové hospodářství
Metan
Odsávání plynu
Metoda konečných objemů

Dissertation thesis - Modeling of Gas Flow in Landfills

Supervisor: prof. Ing. Vladimír Strakoš, DrSc.

graduant: Ing. Josef Pončík

Annotation

The thesis deals with physical and chemical processes in landfills of municipal waste where the landfill gas arises. This gas must be exhausted otherwise it has undesirable influence to the environment. There is also possibility of blow-up. Attention is focused on possibilities of simulation of these processes and usage of gained information.

Contents of thesis is making of simulation model which simulates physical and chemical processes in landfill and makes possible to watch them. This model contains of mathematically model of landfill gas arising and its streaming in landfills. This model contain also algorithms for control of gas exhaustion from landfills and makes it possible to utilization. Finite Volume Method is used for simulation. This method dispose landfill to elements. The computer program is made from the model and makes it possible to experiment with input data and gain important output data in different ways, including graphs of historical evolution of gas exhaustion parameters. Experiments are performed on the model with different input parameters and done with usage of different ways to control a simulation. In thesis there are done conclusions from experiments.

Keywords: Waste
Landfills
Waste management
Methane
Gas exhaustion
Finite Volume Method

Místopřísežně prohlašuji, že jsem autorem této disertační práce.

V Ostravě dne

.....

Ing. Josef Pončík

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Vladimíru Strakošovi, DrSc. za vedení, cenné rady a konzultace, které mi poskytl během zpracovávání mé disertační práce. Dále bych chtěl poděkovat také všem profesorům, docentům a ostatním zaměstnancům institutu ekonomiky a systémů řízení za jejich ochotu a vstřícnost.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1 Úvod	10
1.1 Cíle disertační práce	11
2 Odpad a jeho biologický rozklad.....	12
2.1 Složení odpadů	14
2.2 Rozklad odpadu na skládkách	17
2.3 Faktory ovlivňující anaerobní procesy	20
2.4 Metan.....	21
2.4.1 Vývin metanu na skládkách.....	22
2.4.2 Využití metanu	24
3 Skládkování	26
3.1 Dělení skládek	26
3.2 Výstavba skládek.....	29
3.3 Zabezpečení skládek.....	29
3.4 Odplyňovací systém skládky	30
3.5 Reaktorové skládky	32
4 Možnosti modelování skládek	33
4.1 Geologický model	33
4.2 Grafická síť	35
4.3 Fluent.....	36
4.4 Neuronové sítě.....	38
4.5 Pomocný nástroj pro zobrazení - Surfer	40
5 Analýza proudění plynu skládkovým materiálem	41

6	Návrh řízení těžby plynu ze skládky	45
7	Program Skládka	53
7.1	Simulační program - rozbor problému	53
7.2	Matematický model pro simulační program.....	54
7.3	Odvození vztahu pro krok simulace	57
7.4	Vlastnosti simulačního programu	63
8	Experimenty s modelem	74
8.1	První kontrolní experiment s ustálením.....	78
8.2	Vliv dělitele kroku simulace.....	82
8.3	Vliv počtu elementů	87
8.4	Vliv odporu materiálu.....	92
8.5	Vliv odporu vrtů	93
8.6	Charakteristika vývěvy	96
8.7	Maximalizace množství.....	101
8.8	Závěr z experimentů	106
9	Závěr.....	107
10	Seznam obrázků.....	111
11	Seznam tabulek.....	113
12	Seznam použité literatury	114
13	Seznam vlastních publikací doktoranda	117

Seznam použitých symbolů a zkratek

C_l	koncentrace metanu ve vrtu s maximální koncentrací	[%]
C_e	povolená odchylka minimální požadované koncentrace metanu	[%]
C_i	koncentrace metanu v plynu odsávaného z vrtu s indexem i	[%]
C_k	konstantní požadovaná koncentrace metanu	[%]
C_{min}	minimální požadovaná koncentrace metanu	[%]
C_{pov}	koncentrace metanu v plynu odsávaného z vrtu s indexem rovným počtu otevřených vrtů (seřazeno podle koncentrace metanu)	[%]
L_m	délka úseku v materiálu	[m]
L_v	délka části vrtu	[m]
n	exponent (mocnitel) podle typu proudění	[-]
n_p	objemová pórovitost	[-]
p	tlak v elementu	[Pa]
p_{atm}	atmosférický tlak	[Pa]
p_{ov}	počet otevřených vrtů	[-]
p_v	počet vrtů	[-]
Δp	rozdíl tlaku na daném úseku skládky	[Pa]
Δp_K	rozdíl tlaku způsobený přesunutým plynem během kroku simulace	[Pa]
Δp_v	rozdíl tlaku na daném úseku vrtu	[Pa]
q_i	množství plynu odsávaného z vrtu s indexem i	[m ³ .s ⁻¹]
Q	odsávané množství	[m ³ .s ⁻¹]
Q_e	povolená odchylka požadovaného množství odsávaného plynu	[m ³ .s ⁻¹]
Q_k	konstantní požadované množství odsávaného plynu	[m ³ .s ⁻¹]
Q_{min}	minimální požadované množství odsávaného plynu	[m ³ .s ⁻¹]
Q_M	hmotnostní průtok	[m ³ .s ⁻¹]
Q_V	objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
r	poloměr vrtu	[m]

R	odpor úseku proti proudění	$[\text{kg.m}^{-4}.\text{s}^{-1}]$
R_m	měrný odpor materiálu při lineárním proudění	$[\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}]$
R_M	odpor části vrtu (ve vztahu pro hmotnostní průtok)	$[\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
R_{mv}	měrný odpor vrtu (o délce 1 m) při lineárním proudění	$[\text{kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}]$
R_u	odpor uzávěru vrtu	$[\text{kg.m}^{-4}.\text{s}^{-1}]$
R_V	aerodynamický odpor části vrtu	$[\text{kg.m}^{-7}]$
S	plocha, kterou plyn proudí mezi elementy	$[\text{m}^2]$
T_K	krok simulace	$[\text{s}]$
T_{Kmax}	maximální krok simulace	$[\text{s}]$
ΔV	změna množství plynu v elementu	$[\text{m}^3]$
ΔV_K	množství plynu přesunutého během kroku simulace	$[\text{m}^3]$
V	objem plynu při tlaku p_{atm}	$[\text{m}^3]$
V_o	volný objem elementu (součet vzduchových mezer v elementu)	$[\text{m}^3]$

BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
BRO	biologicky rozložitelný odpad
ČOV	čistička odpadních vod
DKS	dělitel kroku simulace
DSD	Duales System Deutschland (německý systém nakládání s obaly)
EKO-KOM	systém tříděného sběru odpadu v obcích
EU	Evropská unie
ISOH	Informační systém odpadového hospodářství
KO	komunální odpad
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
POH ČR	Plánu odpadového hospodářství České republiky
TKO	tuhý komunální odpad

1 Úvod

Vliv člověka na životní prostředí neustále vzrůstá. Zintenzivňuje se čerpání energetických a surovinových zdrojů, a tak dochází k s tím souvisejícímu narušování přírodního prostředí. Výsledkem je znečišťování vody, ovzduší a půdy, růst množství odpadů včetně odpadů nebezpečných.

Velmi negativně působí odpady nesprávně uložené v přírodě, např. tzv. divoké skládky, starší skládky, které již nevyhovují dnešním normám, apod. Zvláště jedná-li se o odpady toxické a nebezpečné.

Obecné povědomí o nutnosti udržování životního prostředí se stále zvyšuje, a tak je tomu i v případě domovního odpadu. Ve stále více oblastech a domácnostech dochází k třídění a sběru odpadů. Vzhledem k této stále větší nutnosti naší doby o co nejmenší zatěžování životního prostředí negativními vlivy, je třeba věnovat zvýšenou péči i skládkování a zneškodňování či alternativnímu využití domovního odpadu na skládkách.

Na skládkách vzniká biochemickými procesy plyn, jehož podstatnou částí je metan. Plyn je proto při určité koncentraci výbušnou směsí. Skládku je proto nutno odplyňovat, aby se předešlo možným výbuchům nashromážděného plynu, ale také, aby se do okolí nešířil jeho zápach. Vzhledem k vysoké výhřevnosti metanu lze tento skládkový plyn za určitých podmínek účelně spalovat.

1.1 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je návrh modelu a vytvoření programového modulu, který umožní simulovat vlastnosti skládky a proudění plynu, jenž se ve skládce vyvíjí, a na základě výsledků experimentů s modelem předcházet některým nevhodným situacím.

K dosažení hlavního cíle disertační práce je třeba zpracovat následující dílčí cíle.

1. Teoretický rozbor proudění plynu skládkovým materiálem.
2. Matematický model proudění.
3. Stanovení kroku simulace s cílem zrychlit a zpřesnit průběh simulace.
4. Experimenty s modelem.
5. Návrh řízení těžby plynu ze skládky.

2 Odpad a jeho biologický rozklad

Odpad je součástí výsledku každodenní činnosti člověka. Různé druhy odpadu je však nutné vhodným způsobem zneškodnit, a to s ohledem na závažnost jeho vlivu na životní prostředí.

Odpad z domácností, zvaný komunální odpad, je speciální nejen svou povahou, ale je to jediný odpad, za který nenese přímou odpovědnost jeho producent. Zodpovědnost přejímá obec a občané pouze platí s tím spojené náklady. V oblasti nakládání s komunálním odpadem jsou velmi důležité vzdělávací a propagační akce, aby si lidé uvědomili všechny souvislosti [Juchelková aj. 2004].

Nakládáním s biologicky rozložitelným komunálním odpadem (dále jen BRKO) se zabývá Směrnice evropského parlamentu a Rady 2006/12/ES o odpadech, zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů i z Nařízení vlády č. 197/2003 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky (dále jen POH ČR). Navrhovaná novela Směrnice evropského parlamentu a Rady 2006/12/ES o odpadech ukládá třídit a materiálově využívat vznikající odpad, a že členské státy musí mít integrovanou a odpovídající síť zařízení na odstraňování odpadů a zařízení na využívání komunálních odpadů [Stejskal 2009].

Jedním z cílů POH ČR je zvýšit materiálové využití komunálních odpadů na 50 % do roku 2010 ve srovnání s rokem 2000. Dalším cílem POH ČR je snížit maximální množství BRKO ukládaných na skládky tak, aby podíl této složky činil v roce 2010 nejvíce 75 % hm., v roce 2013 nejvíce 50 % hm. a výhledově v roce 2020 nejvíce 35 % hm. z celkového množství BRKO vzniklého v roce 1995. Tyto cíle POH ČR dosud nejsou uspokojivě plněny, zvláště špatná situace je v případě ukládání BRKO na skládku, kde oproti stanovenému cíli dochází k nárůstu množství BRKO ukládaného na skládku [Stejskal 2009].

Odpadové hospodářství v zahraničí

Jedním z ústředních cílů Švýcarského odpadového hospodářství je skládkovat odpady v životním prostředí pouze v chemicky stabilní, ve vodě nerozpustné a anorganické formě. Ve většině případů je proto třeba odpad upravovat pomocí technických postupů, z nich mimořádný význam má spalování odpadů, které je výhodné pro chemickou stabilizaci a objemovou redukci odpadu [Český ekologický ústav].

Značná část komunálního odpadu je tvořena obalovými odpady. V Evropské unii jsou uplatňovány různé modely nakládání s obaly [Božek, Urban a Zemánek 2003]:

- německý systém DSD (Duales System Deutschland) založený na samostatném sběru obalových odpadů, plně hrazeném výrobcí a dovozci,
- švédský systém aplikující zálohování vybraných druhů obalů, který vede k vysokému stupni recyklace, ale nevýhodou je vysoká cena,
- francouzský systém Ecoemballages, kdy nakládání s odpady z obalů probíhá v rámci nakládání s komunálním odpadem, míry využití obalových odpadů je srovnatelná s německým modelem, avšak za podstatně nižších nákladů.

Nejefektivnější jsou systémy organizované v přímé spolupráci obce s průmyslem [Božek, Urban a Zemánek 2003].

EKO-KOM

V České republice se používá systém EKO-KOM zajišťující sdružené plnění povinností zpětného odběru a využití odpadů z obalů prostřednictvím systémů tříděného sběru v obcích a prostřednictvím činnosti osob oprávněných nakládat s odpadem [EKO-KOM, a.s.]. Tento systém využívají téměř všichni obyvatelé České republiky. V roce 2002 žilo v obcích, kde probíhalo třídění odpadů, zhruba osmdesát osm procent obyvatel. Vytrídili 24,4 kilogramu odpadů na obyvatele a rok. O pět let později, v roce 2007, to bylo již 48,7 kg na obyvatele a rok a v loňském roce dosáhla výtěžnost vytríděného odpadu na obyvatele a rok hodnoty 53,1 kg [Grolmus 2009].

2.1 Složení odpadů

Složení a struktura odpadů jsou závislé na různých faktorech, ale hlavně na jeho původu. Odpad rozdělujeme podle různých hledisek, např. skupenství, původ, vliv na okolí, možnost dalšího využití, možný způsob zneškodnění, aj.

Dělení podle zdroje nebo průmyslu [Pichtel 2005]:

- komunální,
- nebezpečný,
- průmyslový,
- zdravotnický,
- univerzální,
- stavební,

- radioaktivní,
- z dolování a těžby,
- zemědělský.

Podle vlivu na životní prostředí:

- zvláštní,
- nebezpečné,
- ostatní.

Složení komunálního odpadu

Pichtel [2005] uvádí způsoby získání vzorků komunálního odpadu:

- přímý výběr,
- toky materiálu,
- průzkum,
- multiplikátory pro návrh množství odpadu.

Přímý výběr je užitečný na malém rozsahu pro získání informací o složení komunálního odpadu a zahrnuje fyzické vzorkování a třídění. Přestože odpad může být velmi heterogenní, jde o jednu z nejpřesnějších metod popisujících povahu odpadu [Pichtel 2005].

Metoda toků materiálu vychází z odhadu toku materiálu a je užitečná pro odhad složení tvořeného odpadu na regionální úrovni [Pichtel 2005].

Průzkum odhaduje množství a kompozici odpadu pomocí dotazníků na producenty odpadu. Tato metoda je obvykle využívána u původců komerčního a průmyslového odpadu, nefunguje efektivně na domácnosti [Pichtel 2005].

Metoda multiplikátorů pro návrh množství odpadu užívá multiplikátory tvorby odpadu pro odhad množství odpadu ze zdrojů daného regionu [Pichtel 2005].

Pro zjištění složení odpadu na skládce je možné využít pouze metodu přímého výběru.

Magistrát hl. m. Prahy na svých internetových stránkách uvádí výstup z Informačního systému o odpadech (ISOH), který pro ministerstvo životního prostředí provozuje Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M. – Centrum pro hospodaření s odpady. Tabulka 2.1 zachycuje rozdělení produkce odpadů v Praze v letech 2002 a 2003 podle OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) [Magistrát hl. m. Prahy 2005].

Tab. 2.1 Produkce odpadů v členění dle OECD [Magistrát hl. m. Prahy 2005]

Odpady / Waste	2002 [t.rok ⁻¹]	2003 [t.rok ⁻¹]
Odpady ze zemědělství a lesnictví <i>Waste from agriculture and forestry</i>	17 714	26 976
Odpady z dolování a těžby / <i>Mining waste</i>	203	227
Průmyslové odpady / <i>Industrial waste</i>	107 544	85 055
Odpad z energetiky (mimo radioaktiv.) <i>Energy industry waste (except radioactive waste)</i>	63 837	64 671
Odpady ze stavebnictví / <i>Demolition waste (rubble)</i>	1 885 572	1 743 132
Odpady ze zdravotnictví / <i>Medical waste</i>	4 541	5 540
Komunální odpady / <i>Municipal waste</i>	560 254	566 693
Jiné odpady / <i>Other waste</i>	1 101 413	878 189
Celkem / Total	3 741 078	3 370 483

Možnosti nakládání s odpady

Nelze-li se při použitém procesu vyhnout vzniku odpadu, priority v nakládání s odpady podle vlivu na životní prostředí jsou následující [Novotný a Červinka]:

1. omezení vzniku odpadu u výrobce (původce),
2. využití odpadů
 - materiálové (recyklace),
 - energetické (spalování),
3. zneškodnění odpadů.

Některé druhy odpadů mohou být velmi účinně spalovány. Například biomasu ve formě dřevní štěpky nebo pelet lze speciálními technologiemi spalovat v kotlích s účinností přes 90 %, avšak v současnosti se spaluje v elektrárnách s účinností kolem 20 % [Řezáč 2009].

Další možností využití TKO je výroba kapalných paliv II. generace. Sladký [2009] uvádí, cituji: „Při produkci 100 tis. tun odpadů ročně je k výrobě bionafty k dispozici asi 61 tis. tun vlhké suroviny, tj. asi 29,5 tis. tun suché vstupní suroviny.“

2.2 Rozklad odpadu na skládkách

Rozklad odpadu umožňují biologické procesy. Po navezení a zhutnění odpadu začínají na sebe navazující stupně biologického rozpadu. Přitom vzniká tzv. „skládkový plyn“ také

zvaný „bioplyn“. Složení tohoto plynu je závislé na mnoha faktorech a níže uvedených fázích biologického odpadu, které jsou převzaty z literatury [Altman a Růžička 1996].

Aerobní fáze

Již při sběru odpadu se začínají rozkládat nejméně stabilní části odpadu za přístupu vzdušného kyslíku. Fáze ustává během několika dnů až týdnů vyčerpáním kyslíku.

Kyselinotvorná (acidogenní) fáze

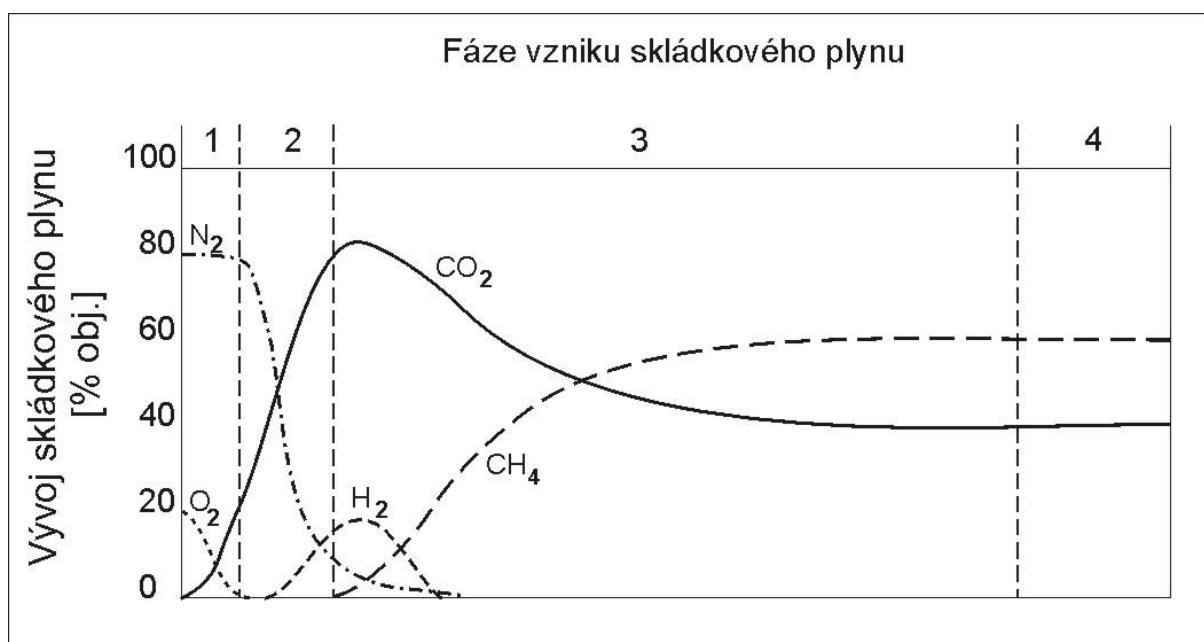
Tato fáze je aktivována společenstvím kyselinotvorných bakterií při postupném ubývání dostupného kyslíku. Tyto kyselinotvorné bakterie začínají vytvářet oxid uhličitý (CO_2) a mastné kyseliny.

Metanogenní fáze

Při nedostatku vzduchu začnou během několika týdnů až měsíců působit metanogeny. Fáze se dělí na stabilizovanou a nestabilizovanou. Stabilizovaná fáze probíhá jako fáze závěrečná až do jejího úplného vyčerpání. Ke stabilizaci fáze metanogeneze (vzniku metanu) je třeba přísných anaerobních podmínek. Metanogenní procesy zpracovávají produkty anaerobních acidogenů na finální plynné produkty – metan (CH_4) a oxid uhličitý (CO_2). Poměr těchto dvou základních plynů závisí na rozvoji metanogenů ve skládce. Tento poměr není obecně konstantní a mění se s časem podle podmínek a složení substrátu.

Existuje více druhů metan produkujících organismů, přičemž pro jejich optimální růst a tvorbu metanu je vhodné rozdílné prostředí. Na téma metanogenů Straka [2006, s. 454] uvádí, cituji: „Současné studium metan produkujících mikroorganismů se velmi intenzivně rozvíjí s využitím moderních metod genového inženýrství i chemické analýzy. Ve skládkových výluhových vodách byla zjištěna přítomnost 241 sekvencí z archaeobakterií, z nichž 60 % bylo připsáno druhům *Methanosaeta* (acetoklastické mikroorganismy) a 22 % rodu *Methanosarcina*. Dále byly nalezeny sekvence příslušející *Methanomicrobiales* (*Methanoculleus*, *Methanofollis*, *Methanospirillum*).“

Obrázek 2.1 zobrazuje grafické znázornění uvedených fází daných procesů. První fáze trvá maximálně jeden měsíc, druhá několik měsíců a poslední řádově léta až desetiletí [Juchelková 2000].



Obr. 2.1 Graf postupného vývoje skladby skládkových plynů [Juchelková 2000]

2.3 Faktory ovlivňující anaerobní procesy

Dohányos, Zábranská a Jeníček [1996, s. 30] uvádí, citují: „Anaerobní rozklad organických látek je ovlivňován řadou faktorů, které buď přímo nebo nepřímo mění životní prostředí anaerobních mikroorganismů, což je teplota, pH, charakter substrátu, nutrienty, toxické látky a pod.“

Vliv pH

Optimální pH růstu metanogenních bakterií leží v neutrální oblasti s přípustným rozmezím závislým na druhu organismu, pro většinu vyhovuje 6,2 až 7,8. Úzký rozsah pH, optimálního pro růst metanogenních mikroorganismů je závažný limitující faktor procesu. Acidogenní bakterie jsou méně citlivé na nízké pH, optimální hodnoty pH mikroorganismů předmetanizační fáze se pohybují nad pH 5 [Dohányos, Zábranská a Jeníček 1996, s. 30].

Vliv složení substrátu

Vliv složení substrátu a obsahu dusíku (N), fosforu (P), uhlíku (C) také zásadně ovlivňuje anaerobní procesy. Dohányos, Zábranská a Jeníček [1996, s. 31] uvádí, citují: „Pro optimální průběh anaerobního rozkladu je nutný správný poměr N a P k organickým látkám – $C:N:P = 100:1:0,2$, který je vzhledem k pomalému růstu anaerobních mikroorganismů mnohem nižší než u aerobních procesů.“ Také přítomnost některých stopových prvků (nikl, kobalt, molybden) zvyšuje metanogenní aktivitu, zvyšuje růst anaerobní biomasy a stimuluje její agregaci.“

Vliv teploty

S rostoucí teplotou vzrůstá rychlost vzrůstá rychlost všech biochemických reakcí. Se změnou teploty se mění zastoupení jednotlivých druhů, což může způsobit porušení rovnováhy procesu. Je důležitější vést proces při takové teplotě, kterou lze udržovat konstantní, než při teplotě vyšší ale s kolísáním její hodnoty. Mikrobiální tvorba methanu probíhá v širokém teplotním rozmezí od 4°C do 97 °C [Dohányos, Zábranská a Jeníček 1996].

Altman a Růžička [1996, s. 39] uvádí, citují: „Metanogenní organismy v dostatečně hlubokých skládkách běžně vytvářejí teploty 35 – 50 °C, jsou však schopny aktivně existovat až do 75 °C. Pokles teploty lože pod 20 °C má však negativní vliv na aktivitu populace metanogenů.“

Vliv vlhkosti

Metanogenní organismy potřebují alespoň 50% vlhkost, aby mohly pracovat a množit se, na rozdíl aerobních organismů [Schulz a Eder 2004].

2.4 Metan

Metan je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, vznikající bakteriálním rozkladem rostlinné a živočišné hmoty za nepřítomnosti kyslíku.

- Plyn metan je při normální teplotě lehčí než vzduch – hustota $0,7175 \text{ kg.m}^{-3}$,
- bod tání je $-183 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a bod varu $-164 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- málo rozpustný ve vodě,
- metan je hořlavý, teplota zápalnosti $595 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- meze výbušnosti: dolní – 5 %, horní – 15 %,
- metan není toxický, ale snížením koncentrace kyslíku může způsobit udušení.

Hlavními zdroji metanu uvolňovaného do ovzduší jsou [Nátr 2006]:

- anaerobní rozklad v mokřadech (včetně rýžových polí) a na skládkách,
- chov skotu,
- únik při získávání a zpracování fosilních paliv,
- uvolňování z oceánů, jezer a spalované biomasy.

2.4.1 Vývin metanu na skládkách

Plyn vznikající na skládkách je třeba odsávat, jinak by docházelo ke zvyšování jeho koncentrace v okolí skládky. Tím by mohlo vzniknout nebezpečí výbuchu. Mimo toto nebezpečí by unikající plyn, jelikož se nejedná o čistý metan, způsoboval zápach v okolí a měl neblahý vliv na veškerý život v tomto prostředí. Kontrolované odplynění skládky a řízené vodní hospodářství v technologicky správně připraveném terénu vytváří ze skládky účinný biologický filtr [Altman a Růžicka 1996].

Každá skládka komunálního odpadu vytváří značné množství skládkového plynu, z jedné tuny uloženého odpadu je to asi 200 – 250 m³. Zachytit však lze jen část produkce plynu, a to v rozmezí 20 – 70 %. Nejvyšší produkce je 5 – 13 let po uložení odpadu. Plyn se však vyvíjí v menší míře 20 – 30 let. Aktivní produkce plynu probíhá až do vyčerpání vody obsažené v tělese skládky a až do zmineralizování odpadu. Při typickém složení skládkových plynů je metanu okolo 60 – 63 % objemu, při špičkových podmínkách může být až 74 % metanu a 25 % CO₂ [Altman a Růžička 1996].

Jedličková [2003, s. 39] uvádí průměrné složení skládkových plynů z odebraných vzorků na skládce ve Frýdku-Místku: „CO₂ = 32,7 %, O₂ = 0,32 %, CH₄ = 65,6 %, N₂ = 1,38 %“.

Množství i složení skládkového plynu závisí na mnoha faktorech. Odsávané množství je vyšší, pokud je odpad vytríděn a předupraven s cílem rychlejšího a intenzivnějšího odbourávání biologicky rozložitelných látek, např. v Holandsku v projektu reaktorové skládky firmy VAM je to po ročním provozu 150 – 200 m³.h⁻¹. Firma předpokládá, že by objem odpadu měl dosáhnout 50000 – 100000 m³ [Gutwald 2006].

Podle množství vznikajícího plynu a koncentrace metanu dělí norma [ČSN 83 8034] skládky do tří tříd (viz tabulka 2.2).

Tab. 2.2 Rozdělení skládek podle normy ČSN 83 8034

Třída	Odplynění	Střední koncentrace CH ₄ v hloubce 0,6m [% objemová]	Měrná produkce plynu z 1milionu m ³ odpadu [m ³ .h ⁻¹]	odplyňovací systém	Energetické využití
I	není nutné	< 7,4	< 1	žádný	žádné
II	je nutné	7,4 až 35	1 až 200	pasivní	žádné
III	je nutné	> 35	> 200	pasivní nebo aktivní	podmíněně možné

2.4.2 Využití metanu

Ještě v 50. letech 20. století, kdy již velmi početné čistírny odpadních vod otápěly bioplynem své anaerobní reaktory pro stabilizaci kalu si nikdo nespojoval pojmy skládka odpadů a plyn, resp. skládka odpadů a bioplyn [Straka 2006].

Kvalita odsávaného plynu z různých částí skládky není vždy stejná. Lze jej však v kompresní stanici třídít. Plyn o stálé kvalitě lze za použití čistícího zařízení využít na výrobu elektrické energie. Nečištěný plyn lze použít pro vytápění blízkých sídlišť nebo zahradnických objektů. Nekvalitní plyn se spaluje ve skládkových pochodních při teplotách 1000 – 1200 °C.

Energetické využití skládkových plynů je možné z důvodu hořlavosti a relativně vysoké výhřevnosti metanu, která činí $49\,610\text{ kJ.kg}^{-1}$.

Možnosti uplatnění skládkového plynu účinnost převzata z [BIJO s. r. o. 1994]:

- přímý otop v hořácích na bioplyn (účinnost 80 – 85 %)
 - v sušárnách,
 - sklenících,
 - vytopnách,
- výroba elektřiny na motorgenerátorech (účinnost 30 – 40 %),
- využití odpadních tepel z plynových motorů (účinnost 40 – 50 %),
- využití komprimovaného plynu pro pohon vozidel nebo pro místní rozvod (při kompresi lze plyn současně vypírat a stlačovat pak již obohacený metan, přitom je možné efektivně vyčistit CO₂ a využít v potravinářské výrobě [Altman a Růžicka 1996]),

- využití plynových motorů pro pohon jiných jednotek než elektrogenátorů
 - vodní (např. závlahová) čerpadla,
 - tepelná čerpadla,
 - chladicí, resp. mrazicí kompresorové agregáty.

Kára [2009] uvádí, že bioplyn je možné po úpravách, odstraňujících zejména oxid uhličitý, uplatnit, cituji: „Jako pohonné látky vozidel a jako topného plynu v síti zemního plynu. Pro zvýšení obsahu metanu přes 95 % se používají různé způsoby tlakových vodních vypírek, membránové filtry, metody adsorpce a absorpce, vymrazování a další. Ve Švédsku a Švýcarsku je v provozu několik desítek bioplynových stanic u čistíren odpadních vod s přiřazeným zařízením pro zušlechťování bioplynu tím, že je z něho odstraňován balastní oxid uhličitý a další nežádoucí příměsi. Odseparovaný plyn s obsahem metanu vyšším než 95 % je komprimován a v Evropě využíván k pohonu více než 10 000 nákladních automobilů a autobusů spolu s fosilním zemním plynem, nebo je vháněn do sítě zemního plynu. Ekonomicky vycházejí výhodně úpravy surového bioplynu na kvalitu zemního plynu u ČOV a skládek KO již dnes, vzhledem k současným cenám motorové nafty a zemního plynu, nehledě na využívání různých dotací a osvobození od DPH. U zemědělských bioplynových stanic uplatnění a vyhodnocení těchto metod probíhá v Rakousku a Německu.“

3 Skládkování

Skládka je technické zařízení určené k odstranění odpadů jejich trvalým a řízeným uložením na zemi nebo do země [ČSN 83 8030].

Skládkování se považuje za nejméně žádoucí formu odstraňování odpadu, přesto se i v blízké budoucnosti počítá s tím, že zůstane nejrozšířenějším způsobem jejich odstraňování (po jejich nezbytné úpravě), pokud se výrazně nezvýší náklady na skládkování. Skládkování zůstává stále dominantním způsobem nakládání s odpady v zemích EU, přestože politika EU směřuje k omezování skládkování BRO. Přibližně 50 % z 243 mil. t vyprodukovaného komunálního odpadu v zemích EU je ukládáno na skládku [Kuraš 2008].

Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech v souladu s předpisy EU omezuje ukládání biologicky rozložitelných komunálních odpadů na skládky. V r. 2010 z celkové produkce 3 mil. t v České republice bude možné na skládky uložit cca 1 mil. t a zbytek biologicky rozložitelných odpadů bude nutno látkově nebo energeticky využít. V zahraničí, kde podobná právní úprava platí již několik let jsou komunální bioodpady využívány anaerobní digestí s výrobou bioplynu [Váňa 2002].

3.1 Dělení skládek

Skládky jsou z hlediska stavebního technickými stavbami, na jejichž dlouholetou životnost je kladen velký nárok [Altman a Růžička 1996]. Rozdělení skládek můžeme provést podle několika hledisek.

Podle způsobu uloženého odpadu

- Řízené skládky – zakládány pouze ve vhodných místech po stránce geologické a hydrologické. Skládka musí být zabezpečena proti průsakům vod nepropustnými jílovými vrstvami zemin, plastickými fóliemi a musí mít zabudován systém drenáží pro odvádění prosáklých srážkových vod. Povrch musí být rekultivován a znovu začleněn do okolního terénu [Herčík 1997].
- Neřízené (divoké) skládky – odpady jsou uloženy bez třídění a organizování, v rozporu s právními předpisy a způsobují škody na okolním životním prostředí [Herčík 1997]. Například na území města Ostravy je celková rozloha neprovozovaných skládek komunálního odpadu odhadována v rozmezí 50 – 100 ha [Statutární město Ostrava 2006].

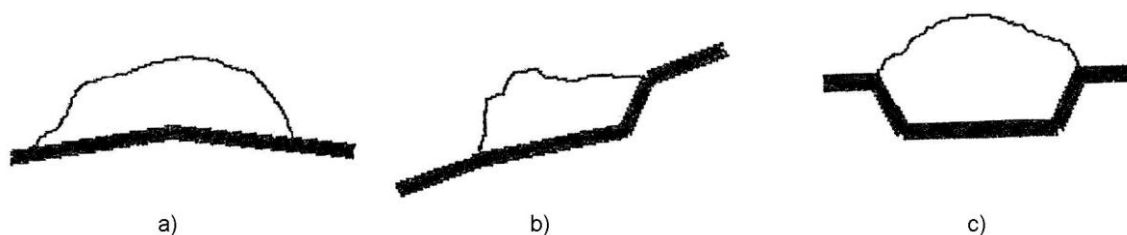
Podle druhu uloženého odpadu [Altman a Růžička 1996]

- Inertní skládky – slouží k ukládání inertních (netečných) odpadů, chemicky neaktivních, například stavební sutiny či sádrové odpady. Není třeba budovat žádná těsnění ani odplyňovací systém.
- Skládky zbytkového odpadu – slouží k uložení zbytků po upravených odpadech s možným zvýšeným obsahem škodlivin. Plynné emise se zde také nevyskytují.
- Přihrádkové skládky – pro ukládání anorganických odpadů v jednotlivých oddělených přihrádkách.
- Reakční skládky – ukládání komunálních a průmyslových odpadů s intenzivními biochemickými reakcemi. Průsaková voda musí být upravena a skládkový plyn pod kontrolou využíván či zneškodňován.

- Podzemní sklárky – pro ukládání nebezpečných dále neupravitelných odpadů. Například odpad radioaktivní. Pro tyto sklárky mohou sloužit bývalé doly.
- Časově omezené sklárky – k uložení později zužitkovaného odpadu.

Rozdělení podle konstrukce sklárky a vztahu k terénu [Pjura 2008]

- Podúrovňová – např. v místech vytěžených lomů,
- nadúrovňová – na nekvalitní lokalitě, případně devastované půdě,
- podzemní,
- svahové,
- násypové,
- kombinované.



Obr. 3.1 Typy povrchových skládek: a) nadúrovňová b) svahová c) podzemní [Pjura 2008]

3.2 Výstavba skládek

Pro výstavbu skládek je zapotřebí nejprve vybrat vhodnou lokalitu. Tento výběr je ovlivňován mimo jiné druhem skládkovaného odpadu. K tomuto účelu se nejlépe hodí neobývaná neplodná území, ke kterým samozřejmě patří také místa zdevastovaná povrchovou těžbou. Pro lepší využití plochy lokality, a tím i snížení měrných nákladů na ukládání odpadu, je třeba budovat co nejvyšší objekty skládek. Samozřejmě podle místních podmínek a možností zakomponování do krajiny. Tímto směrem lze také využívat lokality starých skládek, ať ještě provozovaných nebo již uzavřených [Altman a Růžička 1996].

Vzhledem k finanční náročnosti převozu odpadu je snaha co nejvíce přiblížit místa ukládání a zneškodňování odpadu směrem k těžišti jeho produkce. Při tomto je samozřejmě potřeba přihlédnout na únik škodlivin a vzdálenost od obývaných míst [Altman a Růžička 1996].

3.3 Zabezpečení skládek

Vzhledem k tomu, že v průběhu biochemických procesů na skládce vznikají a uvolňují se škodlivé látky, je nutno tyto izolovat a eliminovat možnost jejich úniku do okolního prostředí. Toho je docíleno jak systémy těsnění, tak systémy odvádění škodlivin [Altman a Růžička 1996].

Těsnicí pásy na dně skládky a na bočních stěnách vytvářejí vodotěsnou plochu, na kterou se soustředí jak čistá dešťová voda, tak voda znečištěná průsakem uloženým materiálem. Tyto vody je třeba urychleně odvést, a tím snížit jejich působení na plášťové těsnění. Z tohoto důvodu je na dně skládky vybudován odvodňovací systém, který má samočinně a trvale splňovat tuto funkci [Altman a Růžička 1996].

3.4 Odplyňovací systém skládky

Struktura odplyňovacího systému skládky má významný vliv na celkovou účinnost odsávání plynu. Nevhodné rozložení odplyňovacích vrtů může způsobit, že z některých míst plyn odsáván nebude, neboť zde vrty nebudou mít účinný dosah, nebo naopak se bude vlivem velkého odsávání v některých místech přisávat okolní vzduch.

Návrhem rozmístění odsávacích vrtů se zabývá literatura [Zezula 2008] na základě měření provedených na síti odsávacích sond na skládce TKO Frýdek-Místek.

Návrh odplyňovacího systému

Před návrhem odplyňovacího systému skládky a zpracování možností upotřebení odsávaného plynu je nutno předem analyzovat několik důležitých bodů ohledně vývinu plynu na skládce. Jsou to [Altman a Růžička 1996]:

- kolik plynu se bude na skládce vytvářet,
- jak dlouho bude skládka plyn poskytovat a jaká bude závislost množství na čase,
- jaké bude složení tohoto plynu,
- kolik čerpacích vrtů bude potřeba.

Na tyto otázky lze na základě informací o množství a složení odpadů odpovědět jen částečně. Je to způsobeno mnoha faktory, jejichž působení je u jednotlivých skládek odlišné.

Jsou to například tyto [Altman a Růžička 1996]:

- rychlost ukládání, stáří a druh odpadu,
- stupeň zhutnění skládky,
- hloubka tělesa skládky,
- přítomnost látek brzdících rozvoj metanogenních organismů (toxické aj.),
- vlhkost odpadů a rovnoměrnost následného vlhčení,
- rozsah a intenzita počátečního aerobního rozkladu odpadů.

Altman a Růžička [1996] uvádí, že vzhledem k těmto působícím faktorům nelze na otázku složení plynu dostatečně správně odpovědět a jedinými spolehlivými informacemi jsou údaje z polního čerpacího vrtu, ať už se jedná o skládku dokončenou nebo teprve zaváženou. U skládek starých a vytvořených bez kontroly ukládaného odpadu často nelze získat podrobnější informace o množství a skladbě uloženého odpadu.

Výběr optimálního systému velmi ovlivňují možnosti využití skládkového plynu, jenž jsou k dispozici.

Odplyňovací systémy

Skládkový plyn je z tělesa skládky čerpán průběžně, avšak těleso skládky můžeme využít v menší míře také jako zásobník vznikajícího plynu.

Sběrná zařízení skládkového plynu lze dělit [Altman a Růžička 1996]:

- a) dle způsobu uložení sběrných těles na:

- vertikální – vrty , sběrné studny,
 - horizontální – drenáže, horizontální vrty,
 - kombinované,
- b) dle času budování systému na:
- systémy budované se zakládáním skládky,
 - systémy budované po dokončení skládky,
- c) dle způsobu odstranění plynu z tělesa skládky na:
- pasivní (plyn uniká vlastním tlakem),
 - aktivní (za pomoci odsávacího zařízení) - účinnost aktivního ku pasivnímu způsobu odsávání plynu z tělesa skládky je zhruba v poměru 5:1.

3.5 Reaktorové skládky

Jako reaktorové skládkování bývá označován proces reaktorové digesce v reaktorových nádržích. Výroba reaktorového bioplynu nabízí podstatně výhodnější podmínky pro řízení průběhu reakcí oproti skládkám tuhých komunálních odpadů. Do těchto nádrží se vkládá předupravený biologický materiál. Proces biologického rozpadu zde probíhá podstatně rychleji než na skládkách [Straka 2003], [Straka 2005].

4 Možnosti modelování skládek

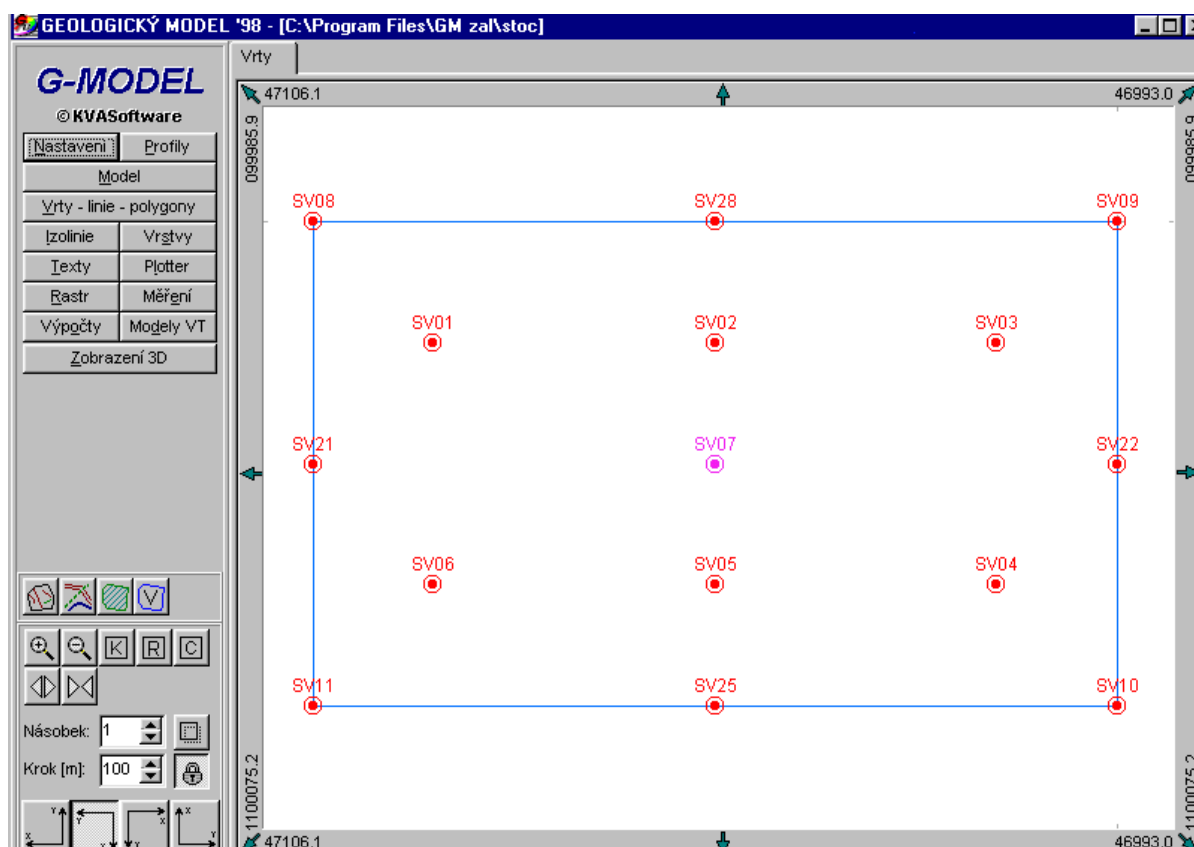
Pro modelování skládek je možné využít několik stávajících programů a metod, z nichž některé uvádím níže.

4.1 Geologický model

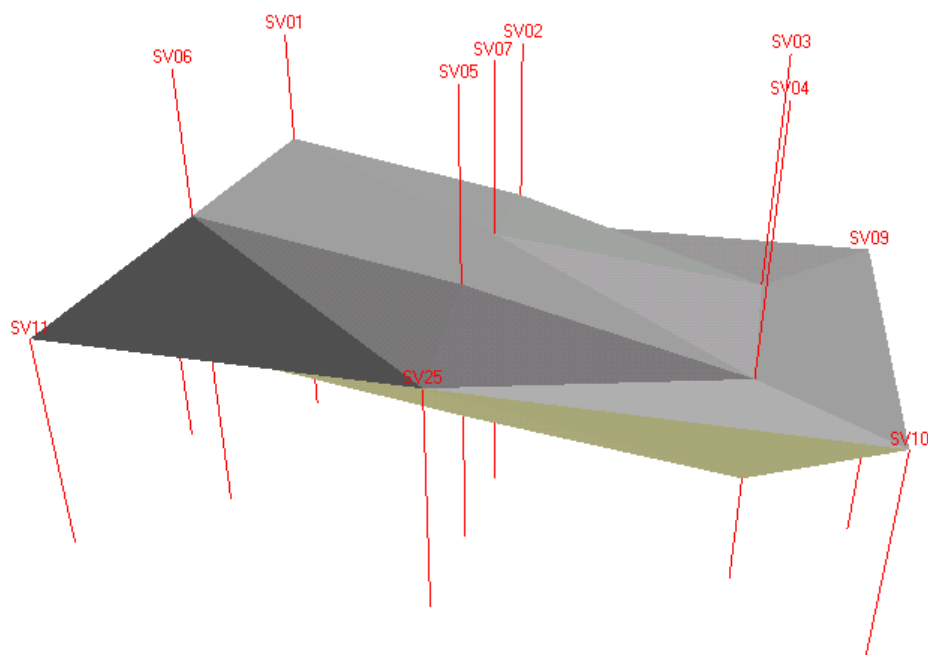
K zobrazení skládky je výhodné využít program Geologický model. Tento program umožňuje vytváření 3D modelů. Zadávaní informací o skládce probíhá načtením údajů o vrtech. Na základě těchto údajů program vygeneruje trigonometrickou síť.

Základním zobrazením v programu je půdorysné zobrazení vrtů. V tomto pohledu můžeme prohlížet a měnit informace o stávajících vrtech, zjistit výškovou strukturu skládky v kterémkoli místě, ale také zadávat linie řezu. Program umožňuje trojrozměrné zobrazování vrstev, ke kterému se mohou přidat předtím vygenerované řezy.

V následujícím příkladu je využita skládka se 6 vrty (viz obrázek 4.1). Příklad 3D zobrazení vrstvy je na obrázku 4.2.



Obr. 4.1 Geologický model



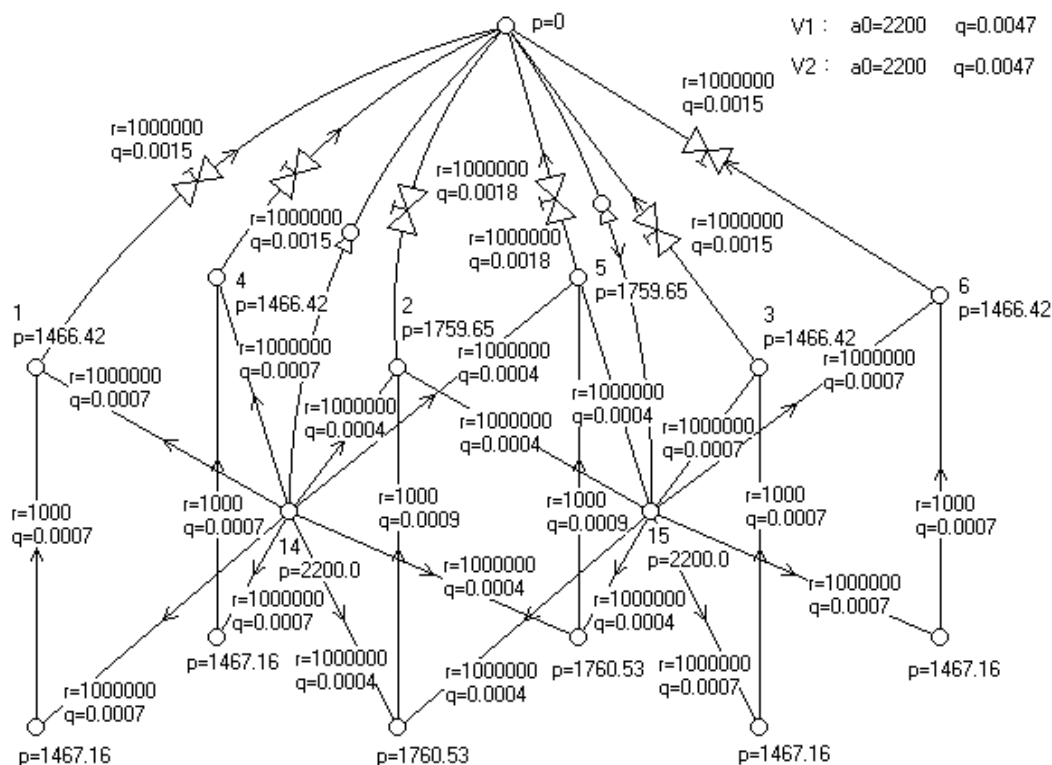
Obr. 4.2 Geologický model – vrstva

4.2 Grafická síť

Program Grafsit je určen pro řešení ustáleného proudění v parametrických sítích, což jsou [Program Graf_Sit]:

- elektrická síť,
- potrubní síť plynu, vody a jiných tekutin, zavlažovací systémy, kanály, řeky apod.

V programu Grafická síť můžeme namodelovat ustálený stav proudění na skládce. Model by byl tvořen sítí složené ze zdrojů plynu (kterých by pro účel modelování skládky bylo potřeba mnoho), podtlaku vývěru a spojení mezi nimi, která by znamenala odpor materiálu nebo vrtu proti proudění plynu. Velmi zjednodušený model skládky se dvěma zdroji je vidět na obrázku 4.3. Avšak nelze v tomto programu simulovat závislosti množství plynu ve skládce (a tím i tlak) na množství již odsátého plynu.



p - tlak v uzlech, q - průtok, r - odpor šoupátek, V1, V2 - charakteristika zdrojů, a_0 - podtlak

Obr. 4.3 Grafická síť - výpočet sítě [Pončík 2002]

4.3 Fluent

Program FLUENT obsahuje fyzikální modely postihující široké možnosti potřebné k modelování proudění, turbulence, přenosu tepla a reakcí pro průmyslové aplikace. Jsou to modely od proudění vzduchu kolem leteckých profilů po spalování v pecích, od modelování probublávání po ropné plošiny, od toku krve po výrobu polovodičů a od návrhu ventilace místností po úpravu a čištění vody. Speciální modely, které dávají softwaru možnosti modelovat multifyzikální úlohy, umožňuje rozšíření působnosti tohoto programu [TechSoft Engineering, spol. s r.o.].

Softwarový program Fluent je nejrozšířenější počítačový program pro modelování proudění tekutiny, přestupu tepla, přenosu hmoty a chemických reakcí [Hummel].

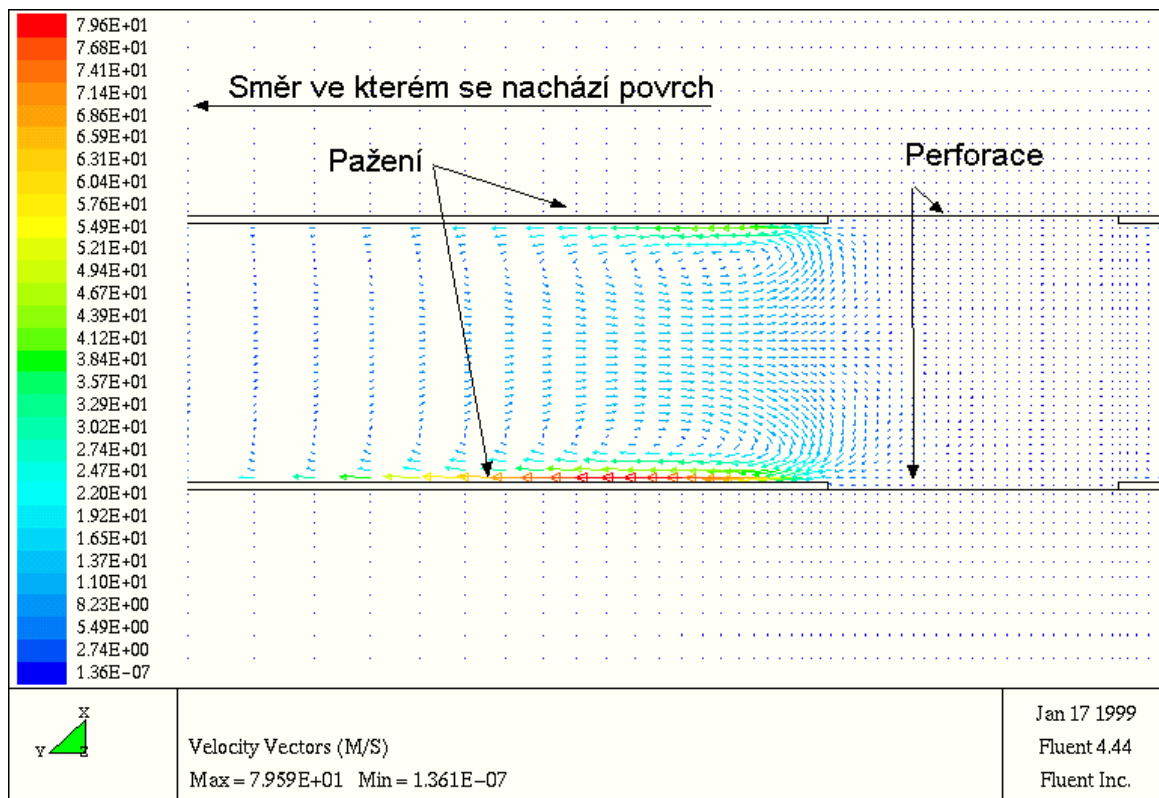
Ukázka zobrazení proudění vrtem pod povrchem z programu Fluent z literatury [Hummel] je na obrázku 4.4.

Metodou konečných objemů může Fluent modelovat širokou řadu úloh proudění tekutin, včetně laminárního i turbulentního proudění plynů [Manuál Fluent 2001]. Modelování v tomto programu předpokládá velké znalosti z oblasti fyziky.

Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů spočívá v následujících třech základních bodech [Kozubková, Drábková a Štáva 1999]:

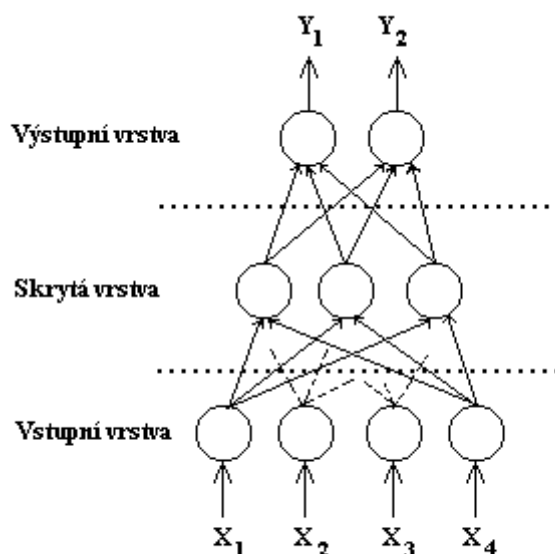
- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě,
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace,
- numerické řešení diskretizovaných rovnic součtem přes sousední buňky.



Obr. 4.4 Fluent – ukázka, proudění vrtem pod povrchem [Hummel]

4.4 Neuronové sítě

Řepka a Kebo [2001] se ve své práci zaměřují na predikci koncentrace metanu, pomocí vrstvených neuronových sítí (viz obrázek 4.5). Ve své práci docházejí k závěru, že jimi použitý druh (vrstvená neuronová síť úplně zapojená) není vhodný k vytváření modelů jejichž funkce závisí také na čase. Proto pro další práci doporučují pracovat s rekurentními neuronovými sítěmi, které by mohli ze své podstaty s časem lépe pracovat než sítě vrstvené.



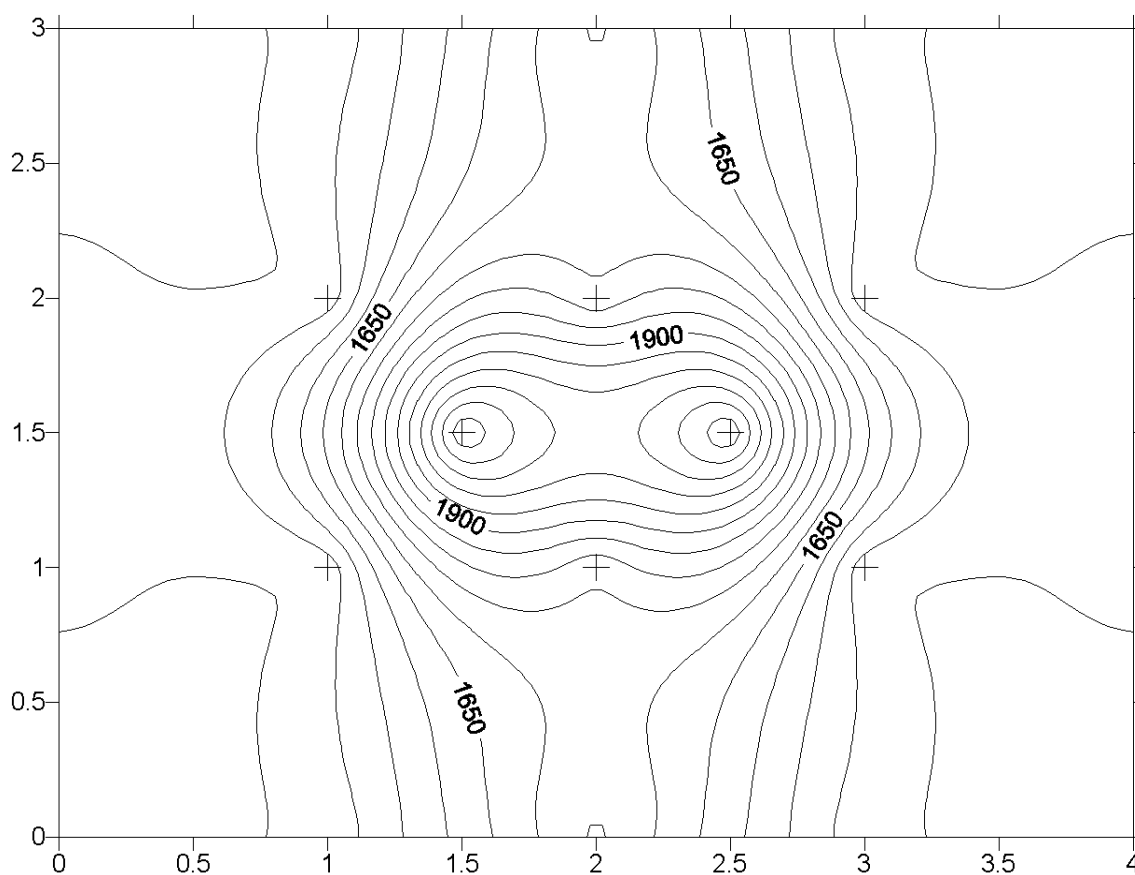
X_1, X_2, X_3, X_4 - vstupní hodnoty, Y_1, Y_2 - výstupní hodnoty

Obr. 4.5 Vícevrstvá neuronová síť s jednou skrytou vrstvou [ŘEPKA a KEBO 2001]

Dílčí závěrečná zpráva úkolu Grantové agentury České republiky 105/01/031 [Landryová a Kebo 2002] se zabývá modelováním procesu rozkladu odpadu skládky pomocí neuronových sítí s využitím dat získaných experimentem v laboratořích university. Neuronové sítě zpracovaly tato data do modelu, který lze využít k predikci hodnot. Autoři dochází k závěru, že za předpokladu, že neuronové sítě budou zpracovávat skutečné hodnoty získávané z měření a při monitorování skládky, významnost predikovaných hodnot produkovaných množství metanu se zvýší a data by mohla být použita pro management sládkovaného odpadu, při plánování a zakládání skládek.

4.5 Pomocný nástroj pro zobrazení - Surfer

Program Surfer firmy Golden Software umožňuje vytváření plošných map izolinií nebo 3D grafy na základě dat v trojrozměrné soustavě souřadnic. Je možné ho využít k zobrazení tlakové mapy ve vodorovné rovině skládky, jak je vidět na obrázku 4.6, ale také by bylo možné použít tento program například pro zobrazení toku plynu.

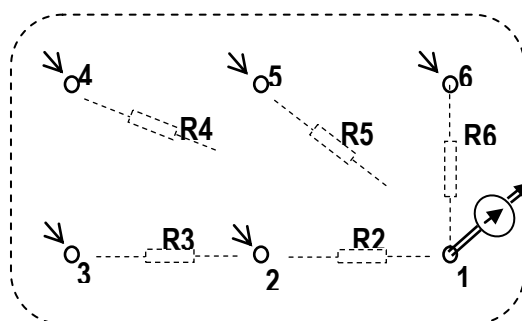


Obr. 4.6 Surfer - rozložení tlakového pole v řezu skládkou [Pončík 2002]

5 Analýza proudění plynu skládkovým materiálem

Popis metod a požadavky na vstupní data

Pro modelování proudění plynu ve skládce potřebujeme znát permeabilitu – propustnost materiálu ve skládce. Toto je velmi důležitá veličina, kterou není možné získat jinak než měřením. Dále je potřeba znát pórovitost materiálu [Strakoš a Pončík 2003].



Obr. 5.1 Proměrování permeability skládky s odsávacím zařízením [Strakoš a Pončík]

Literatury [Kebo 2003] a [Strakoš a Pončík 2003] uvádí, jak je možné proměřit skládku a získat tak permeabilitu nebo odpory vhodné pro modelování, znázorněno na obrázku 5.1. Při měření skládky vycházíme z předpokladu, že na jeden z vrtů napojíme vývěvu a ostatní vrty, nebo pouze jeden, otevřeme. Pak odsáváme plyn tak dlouho (zpravidla několik minut), až otevřený vrt začne nasávat vzduch. Změříme množství vzduchu vtahovaného do vrtu a současně odečteme podtlak vývěvy a vypočteme náhradní odpor z jednoduchého vztahu pro proudění

$$R = \Delta p \cdot Q_v^{-n} \quad (5.1)$$

kde je Δp_v - rozdíl tlaku na daném úseku [Pa],

R_v - odpor úseku proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$],

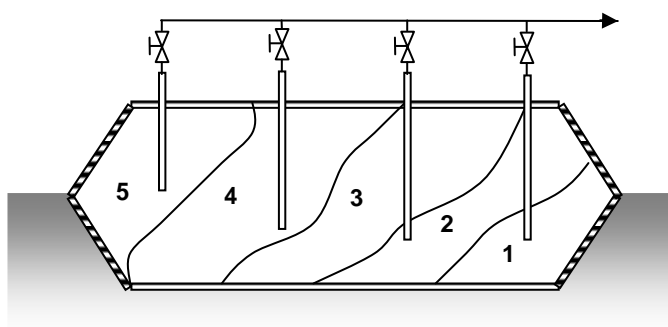
Q_v - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Podle zkušeností autorů je n zpravidla 1 nebo málo větší. Pro větší spolehlivost výsledků měření je vhodné postupně měnit umístění vývěvy, a tím získat odpory v několika směrech. Po takovém, bohužel finančně náročném měření, máme dostatek podkladů pro modelování skládky.

Metoda pro odhad celkové energetické kapacity skládky

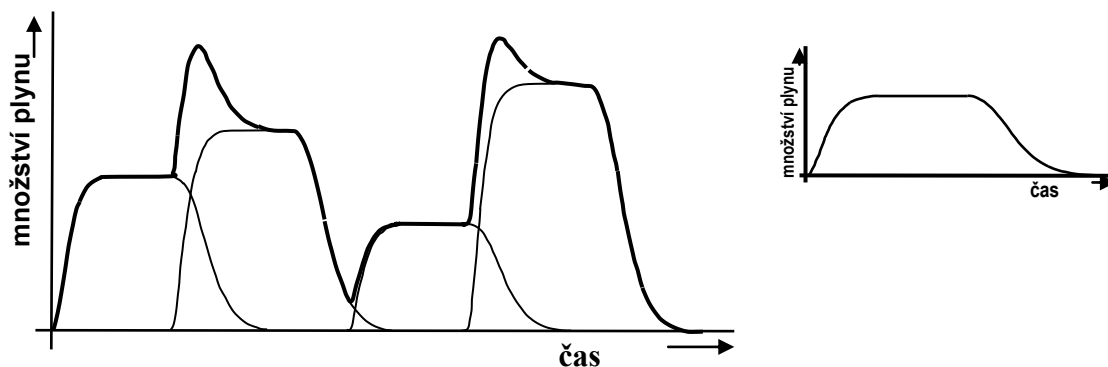
Na základě předchozích faktů víme, že se plyn vyvíjí ve skládce podle obrázku 2.1. Cílem našeho modelování je poznat a pochopit zákonitosti proudění plynu ve skládkách při různých vnějších podmínkách. Na základě ověření námi navržených modelů, pak chceme navrhnout téměř automatické řízení odsávání plynů ze skládek domovního odpadu tak, aby se mohl dobře energeticky zhodnotit.

Skládka se postupně vytváří několik let, materiál je dobře izolován od okolní horniny a kontrolovaně odvodňován a po naplnění vymezeného prostoru zaisolován i shora a to tak, že v skládkovém tělese jsou umístěny studny, nebo zapažené vrty pro odvádění vyvíjejícího se plynu. Uvažujme, že situace po ukončení plnění skládky vypadá jako na obrázku 5.2 [Kebo 2003, Strakoš a Pončík 2003].



Obr. 5.2 Uzavřená skládka připravená pro odsávání plynu [Strakoš a Pončík 2003]

Jednotlivé vrstvy se přivážely postupně, takže již krátce po uložení první vrstvy začal metanotvorný proces. V poslední vrstvě začíná metanotvorný proces výrazně později, takže vývin metanu není v celé skladce stejný. Průběh produkce metanu ve skládce tak získáme součtem přechodových charakteristik jednotlivých vrstev, kterých je teoreticky nekonečné množství. Teoreticky je to součet proporcionálních přechodových charakteristik druhého řádu jak je naznačeno na obrázku 5.3 [Kebo 2003, Strakoš a Pončík 2003].



Obr. 5.3 Teoretický průběh vývinu plynu ve vícevrstvé skládce [Strakoš a Pončík 2003]

Pórovitost

Objemová pórovitost je poměr objemu pórů (vzduchových mezer) v určitém množství materiálu k celkovému objemu tohoto materiálu.

Pórovitost půdy je fyzikální vlastnost půdy vyjadřující objem všech prostor mezi pevnými částicemi. Tato číselná hodnota se udává v procentech. Stanovuje se pykometry nebo se vypočítává.

Typické hodnoty pórovitosti některých materiálu [Famiglietti]:

- štěrk a písek 20 - 50 %,
- hlína 50 - 70 %,
- pískovec 5 - 30 %,
- vápenec 10 - 30 %.

Proudění potrubím pro odvod plynu

Proudění skládkového plynu vrtem můžeme popsat rovnicí [Prokop a Kolasa 1988]:

$$\Delta p_V = R_V \cdot Q_V^2 \quad (5.2)$$

kde je Δp_V - rozdíl tlaku na daném úseku vrtu [Pa],

R_V - aerodynamický odpor části vrtu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-7}$],

Q_V - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Pomocí hmotnostního průtoku můžeme proudění plynu vrtem popsat rovnicí [Viliamsová a Mádr 2004]:

$$\Delta p_V = R_M \cdot Q_M^2 \quad (5.3)$$

kde je Δp_V - rozdíl tlaku na daném úseku vrtu [Pa],

R_M - odpor části vrtu [$\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_M - hmotnostní průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$].

Jednotka [$\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] nebyla uvedena v literatuře [Viliamsová a Mádr 2004], byla proto odvozena z uvedené rovnice (5.3).

6 Návrh řízení těžby plynu ze skládky

Má-li být odsávaný skládkový plyn dále využit, je třeba, aby měl určitou koncentraci plynu. Přitom je potřeba, aby se odsávalo co největší možné množství. Jednak proto, aby bylo zabráněno úniku plynu do prostředí, ale také z důvodu lepšího ekonomického výsledku. Horní hranice odsávaného množství je však omezena hlavně množstvím vznikajícího plynu. Je důležité, aby odsávání plynu nezpůsobovalo nasávání většího množství vzduchu do tělesa skládky, což by mělo negativní vliv na metanogenní procesy na skládce a zvyšování podílu procesů kyselinotvorných, s ohledem na změnu prostředí anaerobního na aerobní. To by vedlo k poklesu koncentrace metanu a zvýšení množství škodlivin ve vodě odváděné z tělesa skládky.

Cíl řízení

Algoritmy pro řízení odsávání plynu ze skládky závisí na požadavcích pro parametry odsávaného plynu. V úvahu připadají následující cíle řízení:

- 1) maximalizace odsávaného množství při dodržení minimální koncentrace metanu,
- 2) maximalizace koncentrace metanu při dodržení minimálního množství odsávaného plynu,
- 3) stabilizace množství odsávaného plynu a maximalizace koncentrace metanu v odsávaném plynu,
- 4) stabilizace množství odsávaného plynu i koncentrace metanu,
- 5) maximalizace odsávaného množství a stabilizace koncentrace metanu.

Algoritmy pro určení odsávaného množství z vrtů

Pro určení odsávaného množství plynu z jednotlivých vrtů můžeme použít například Simplexovu metodu. Její použití při řízení odsávání skládkového plynu je zpracováno v literatuře [Pončík 2002].

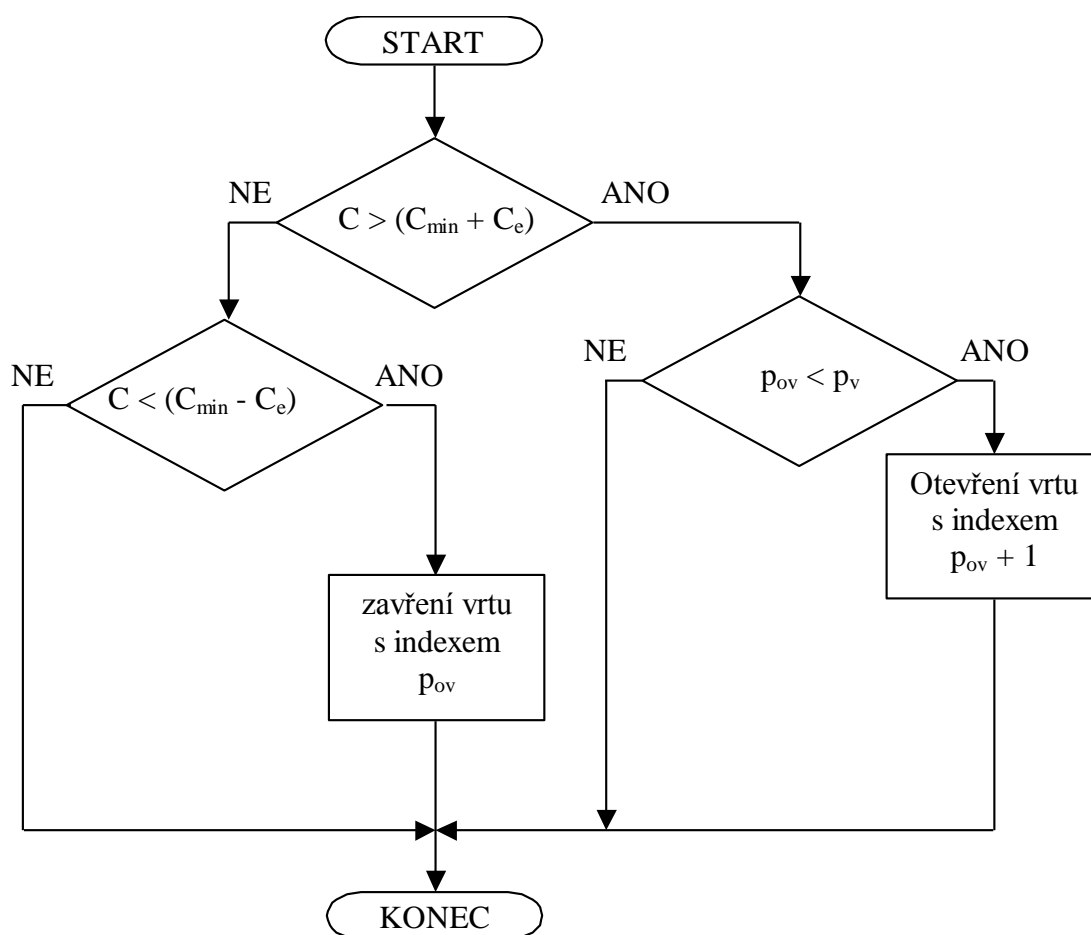
Pro účel této práce byly sestaveny níže uvedené algoritmy v závislosti na cíli řízení. Algoritmus by měl být spouštěn v určitých časových intervalech.

Pro zjednodušení algoritmů:

- předpokládáme, že vrty jsou již seřazeny a indexovány podle koncentrace metanu v odsávaném plynu tak, že vrt s indexem 1 má tuto koncentraci nejvyšší,
- je vždy provedeno úplné otevření nebo uzavření vrtu, přestože při simulaci bude třeba otevírat a zavírat ventil vrtu postupně.

Maximalizace odsávaného množství

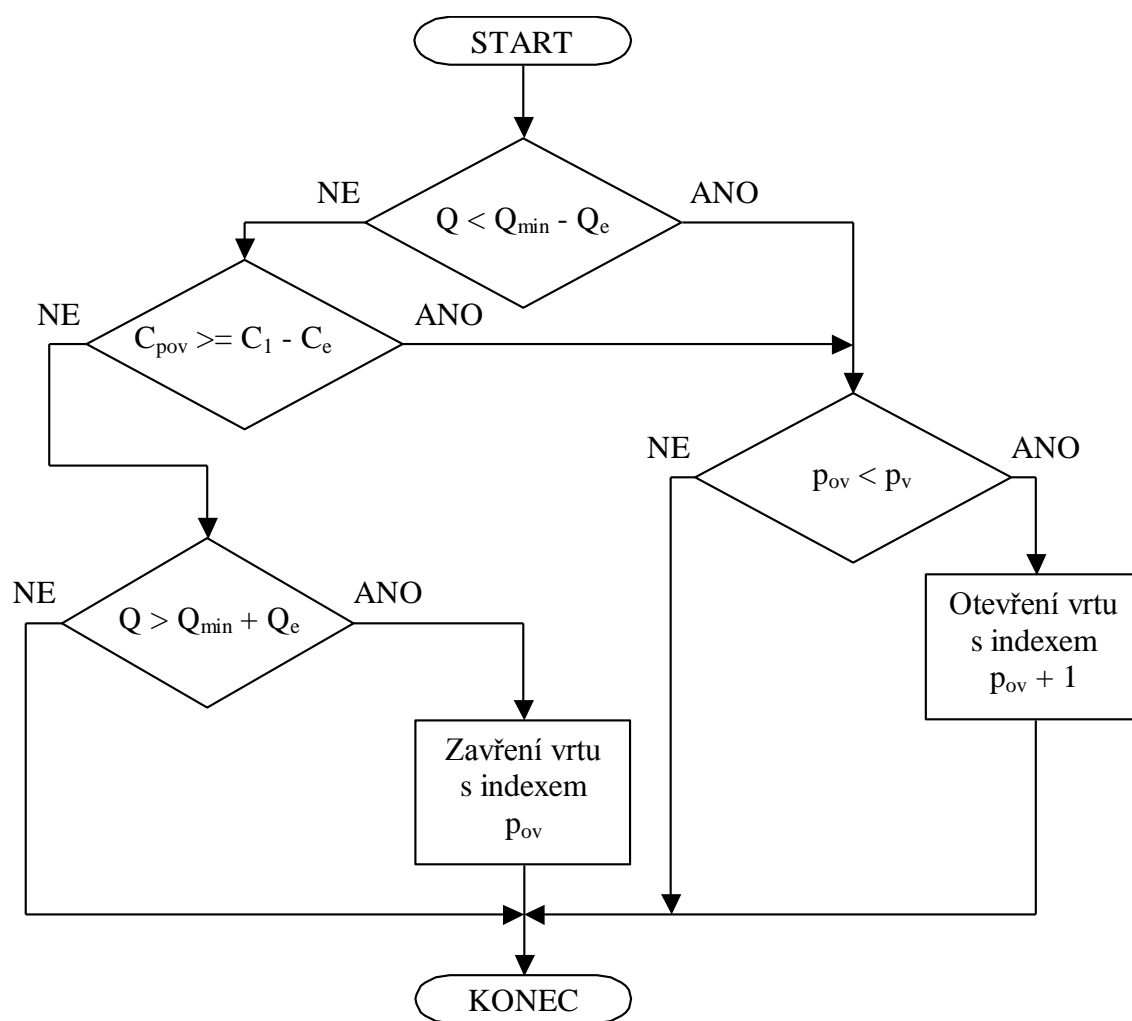
V algoritmu pro maximalizaci odsávaného množství Q při dodržení minimální koncentrace metanu C_{\min} (viz obrázek 6.1) jsou otevřeny všechny vrty s koncentrací vyšší než C_{\min} , poté jsou otvírány (případně zavírány) další vrty, aby bylo udržováno odsávané množství na hodnotě C_{\min} s maximální odchylkou C_e nebo byly otevřeny všechny vrty.



Obr. 6.1 Algoritmus řízení pro maximalizaci Q , dodržení C_{\min}

Maximalizace koncentrace metanu

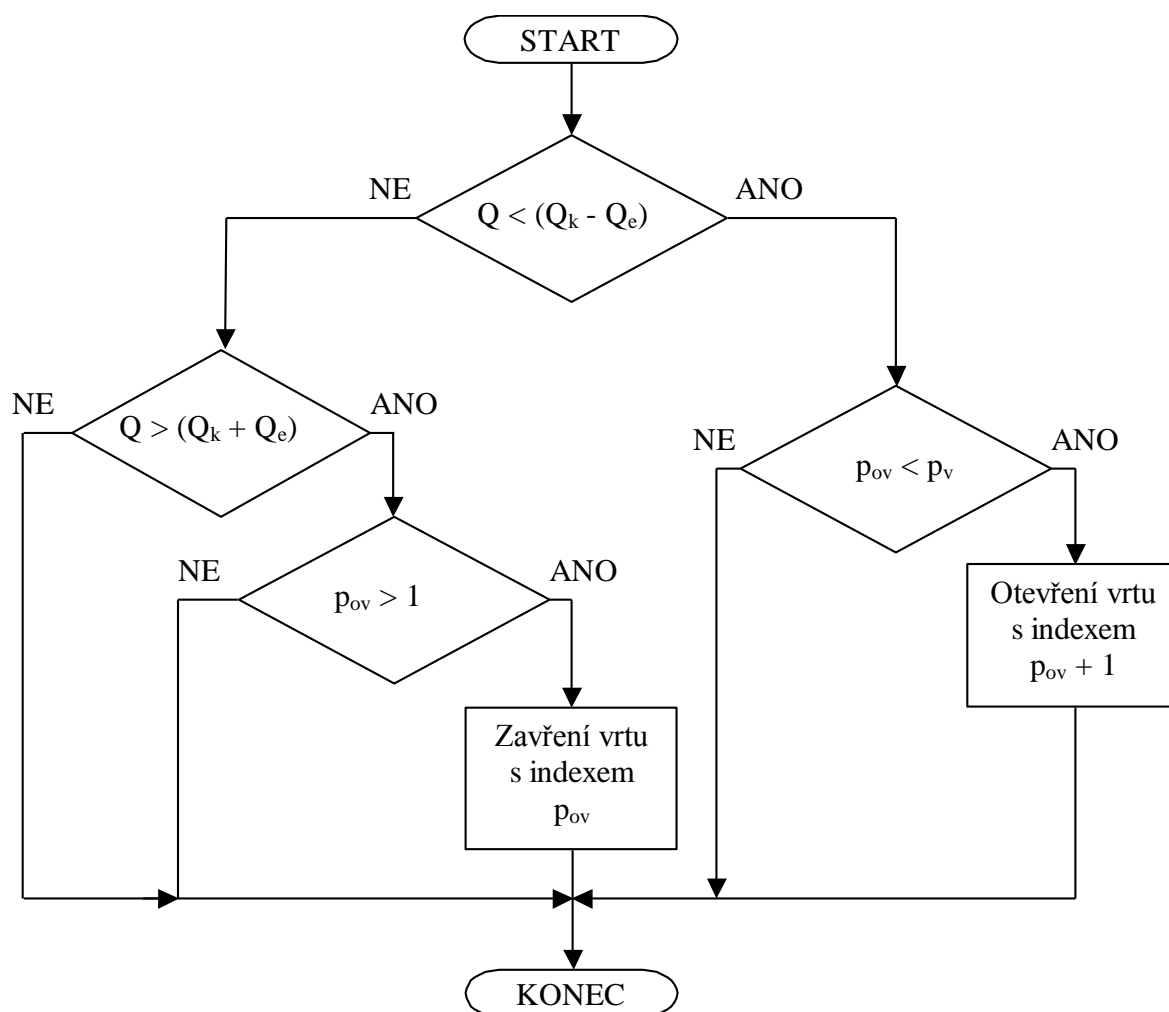
Algoritmus maximalizace koncentrace metanu C při dodržení minimálního množství Q_{\min} odsávaného plynu (viz obrázek 6.2) začíná po otevření vrtu s nejvyšší koncentrací, není-li dosaženo Q_{\min} s maximální odchylkou Q_e , jsou otevírány další vrty v závislosti na jejich koncentraci metanu.



Obr. 6.2 Algoritmus řízení pro dodržení Q_{\min} , maximalizaci C

Stabilizace odsávaného množství a maximalizace koncentrace metanu

Algoritmus stabilizace odsávaného množství a maximalizace koncentrace metanu v odsávaném plynu (viz obrázek 6.3) otevírá potřebný počet vrtů v posloupnosti od vrtů s nejvyšší koncentrací metanu.



Obr. 6.3 Algoritmus řízení pro stabilizaci Q , maximalizaci C

Stabilizace odsávaného množství i koncentrace metanu

Navržený algoritmus stabilizace množství plynu Q i koncentrace metanu C nejprve dosáhne stabilizace množství a poté, je-li koncentrace metanu v celkovém množství větší než požadujeme, zavírá se vrt s vyšší koncentrací a otevírá vrt s nižší koncentrací než je koncentrace žádaná (je-li takový k dispozici). A opačně v případě, že je koncentrace metanu v celkovém množství menší než požadujeme. Grafické znázornění by bylo velmi nepřehledné, proto je algoritmus zaznamenán do tabulky 6.1. V této tabulce jsou uvedeny podmínky a jejich splnění v případě, že dochází k otevírání nebo zavírání vrtu. Samotná programová realizace však může být uskutečněna rozdílnými způsoby.

Tab. 6.1 Otevírání a zavírání vrtů v algoritmu stabilizace Q a C

Podmínka	Splnění podmínky							
$Q > Q_k + Q_e$	ano	ano	ano	ne	ne	ne	ne	ne
$Q < Q_k - Q_e$	ne	ne	ne	ano	ano	ano	ne	ne
$C > C_k + C_e$	ano	ne	ne	ano	ne	ne	ano	ne
$C < C_k - C_e$	ne	ano	ne	ne	ano	ne	ne	ano
Akce na Vrtu s vyšší koncentrací	Z	N	Z	O	N	O	Z	O
Akce na Vrtu Vrt s nižší koncentrací	N	Z	Z	N	O	O	O	Z

Maximalizace odsávaného množství a stabilizace koncentrace metanu

Algoritmus maximalizace odsávaného množství Q a stabilizace koncentrace metanu C testuje pouze koncentraci a podle ní se snaží otevřít co nejvíce vrtů. Proto pokud je to možné, řeší situaci otevřením vrtu, teprve pokud není k dispozici vhodný vrt, provede zavírání vhodného vrtu. Vzhledem k testování, který vrt je otevřen, bylo by grafické znázornění algoritmu mnohem méně přehledné, proto je zaznamenán v tabulce 6.2.

Tab. 6.2 Otvírání a zavírání vrtů v algoritmu maximalizace Q a stabilizace C

Podmínka	Splnění podmínky		
$C > C_k + C_e$	ano	ne	ne
$C < C_k - C_e$	ne	ano	ne
Akce na Vrtu Vrt s vyšší koncentrací ¹⁾	Z	O	O
Akce na Vrtu Vrt s nižší koncentrací ¹⁾	O	Z	O

¹⁾ Zavírání vrtu se provede pouze v případě, že není možné otevřít vrt s vhodnou koncentrací

Nedosažení cíle řízení

V tabulce 6.3 jsou uvedeny situace, kdy nelze odsávat plyn v souladu s cílem řízení. Je uveden důvod proč nelze vyhovět požadavkům podle použitého cíle řízení a také návrh akce, která má být v tomto případě aplikována. V praxi může být žádoucí jiný způsob řešení situace, kdy nemůže být dosaženo cíle řízení.

Pokud například při simulaci v případě, kdy je cílem řízení maximalizace Q a dodržení C_{\min} , ani jeden z vrtů neposkytuje dostatečnou koncentraci metanu, dojde k uzavření vrtů.

Tab. 6.3 Nedosažení cíle řízení

Označení	Cíl řízení	Důvod	Návrh řešení
1	Maximalizace Q , dodržení C_{\min}	Ani jeden z vrtů nedosahuje potřebné koncentrace	Uzavření vrtů
2	Dodržení Q_{\min} , maximalizace C	Skládka neposkytuje dostatečné množství	Odsávat možné množství
3	Stabilizace Q , maximalizace C	Skládka neposkytuje dostatečné množství	Odsávat možné množství
4	Stabilizace Q i C	Skládka neposkytuje dostatečné množství při dané koncentraci	Dočasně řešit jako případ s označením (3)
5	Maximalizace Q , stabilizace C	Všechny vrty mají koncentraci menší (případně větší) než je požadovaná	Uzavření vrtů

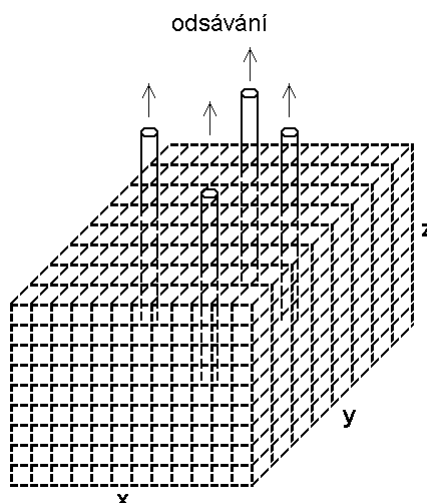
7 Program Skládka

7.1 Simulační program - rozbor problému

Cílem tvorby programu je vytvořit aplikaci, jenž by umožňovala simulaci procesů a odsávání na skládkách s možností sledovat rozložení zde vznikajícího skládkového plynu, vliv odsávání na únik skládkového plynu do ovzduší a vliv délky odsávání na koncentraci metanu v odsávaném plynu a jeho využití.

S využitím metody konečných objemů uvedené v kapitole 4.3 byl vytvořen model skládky tvaru kváдру, ve všech třech osách pravidelně rozdělen tak, že vzniká síť konečných objemů nazvaných „elementy“ (viz obrázek 7.1). Všechny proměnné jsou vztahovány ke středům elementů a každý element představuje v modelu elementární jednotku prostoru. V elementu vzniká plyn, a tím se v něm zvyšuje tlak. Na základě různých tlaků mezi sousedními elementy dochází mezi nimi k výměně plynu. Do této sítě jsou umístěny vrty sloužící pro odsávání plynu pomocí vývěvy. Program na základě zadaných vztahů a parametrů počítá množství proudícího plynu v jednotlivých částech skládky a množství plynu odsávaného. Výpočty proudů a tlaků probíhají vždy pro krátký úsek času (většinou zlomek sekundy). Tento časový úsek je nazván krokem simulace a označen symbolem T_K . Čím menší krok simulace, tím větší přesnost. Při větších časových úsecích je simulace náchylnější k destabilizaci.

Program skládka je určen pro zjištění parametrů skládky a počtu a rozmístění vrtů tak, aby nedocházelo ani k nasávání plynu, neboť způsobuje výrazné změny ve složení vznikajícího plynu, ani k výraznému úniku plynu tělesem skládky. Proto program není určen a není vhodný pro simulaci koncentrace metanu, pokud dochází k nasávání plynu.



Obr. 7.1 Rozdělení skládky na elementy s odsávacími vrty

7.2 Matematický model pro simulační program

Pro proudění vrtem skládky platí vztah (5.2). Ale při realizaci v aplikaci Skládka nelze stanovit maximální krok simulace T_{Kmax} , protože je závislý na rozdílu tlaku na daném úseku vrtu. Proto byl model zjednodušen na lineární proudění vrtem, možnost volby proudění podle vztahu (5.2) v aplikaci zůstává pod názvem „nelineární proudění vrtem“. V tom případě je potřeba zadat dělitel kroku simulace mnohonásobně větší (tisíckrát i více), čímž se simulace mnohonásobně zpomalí. Odvození T_{Kmax} je provedeno v kapitole 7.3. Dalším zjednodušením modulu je konstantní atmosférický tlak.

Součástí modelu je matematické vyjádření vztahů mezi fyzikálními veličinami, které jsou popsány následujícími rovnicemi:

- výpočet množství protékajícího elementy:

ze vztahu (5.1) po dosazení za $n = 1$ získáme:

$$Q_v = \frac{\Delta p}{R} \quad (7.1)$$

kde je Q_v - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

Δp - rozdíl tlaku na daném úseku skládky [Pa],

R - odpor úseku proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$].

- pro odpor odpadového materiálu :

$$R = \frac{R_m \cdot L_m}{S} \quad (7.2)$$

kde je R - odpor úseku proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$],

R_m - měrný odpor materiálu proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$],

L_m - délka úseku v materiálu [m],

S - plocha, kterou plyn proudí mezi elementy [m^2].

- odpor části vrtu při lineárním proudění:

$$R = R_{mv} \cdot L_v \quad (7.3)$$

kde je R - odpor úseku proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$],

R_{mv} - odpor vrtu o délce 1 m při lineárním proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$],

L_v - délka části vrtu [m].

- množství protékající odpadovým materiálem :

sloučením vzorců pro protékající množství (7.1) a pro odpor odpadového materiálu (7.2)

$$Q_v = \frac{\Delta p \cdot S}{R_m \cdot L_m} \quad (7.4)$$

kde je Q_V - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

Δp - rozdíl tlaku na daném úseku skládky [Pa],

R_m - měrný odpor materiálu proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$],

L_m - délka úseku v materiálu [m],

S - plocha, kterou plyn proudí mezi elementy [m^2].

- množství protékající daným úsekem vrtu při lineárním proudění:

sloučením vzorců pro protékající množství (7.1) a pro odpor části vrtu (7.3)

$$Q_V = \frac{\Delta p_v}{R_{mv} \cdot L_v}, \quad (7.5)$$

kde je Q_V - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

Δp - rozdíl tlaku na daném úseku vrtu [Pa],

R_{mv} - odpor vrtu o délce 1 m při lineárním proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$],

L_V - délka části vrtu [m].

- množství protékající daným úsekem vrtu při nelineárním proudění se počítá podle vztahu (5.2)

- změna množství plynu v elementu způsobená tokem plynu:

$$\Delta V = \sum Q_V \cdot T_K \quad (7.6)$$

kde je ΔV - změna množství plynu v elementu [m^3],

Q_V - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

T_K - krok simulace [s].

- výpočet tlaku v elementech je vyjádřením tlaku plynu jako lineární závislosti množství plynu při stálém objemu:

$$p = \frac{V \cdot p_{atm}}{V_o} \quad (7.7)$$

kde je p - tlak v elementu [Pa],

p_{atm} - atmosférický tlak [Pa],

V - objem plynu při tlaku p_{atm} [m³],

V_o - volný objem elementu (součet vzduchových mezer v elementu) [m³].

- objemová pórovitost

$$n_p = \frac{V_o}{S \cdot L_m} \quad (7.8)$$

kde je n_p - objemová pórovitost [-],

L_m - délka úseku v materiálu (elementu) [m],

S - plocha, kterou plyn proudí mezi elementy [m²],

V_o - volný objem elementu (součet vzduchových mezer v elementu) [m³].

7.3 Odvození vztahu pro krok simulace

Krok simulace, jak bylo uvedeno dříve, je krátký elementární úsek simulovaného času, který aplikace používá při výpočtech. Po tuto krátkou dobu jsou hodnoty simulovaných veličin (tlaku a toku plynu) považovány za konstantní.

Původně byl krok simulace počítán z uživatelem požadované rychlosti simulace definované jako poměr změny simulovaného času ku změně reálného času, za který došlo

k uvedené změně simulovaného času. Neboť kolikrát menší je časový úsek simulace, tolikrát déle bude simulace trvat. Takový způsob výpočtu kroku simulace způsoboval, že velikost kroku simulace a tím i přesnost závisela také na rychlosti a aktuálním vytížení počítače. Z toho vyplývá, že každá simulace i při zcela shodném zadání vykazovala rozdílné výsledky. Také při simulaci docházelo k rozkmitání hodnot simulovaných veličin do té míry, že byla simulace ukončena s chybou. Rozkmitání hodnot bylo způsobeno tím, že za dobu stanoveného kroku simulace a vzhledem ke konstantnímu toku plynu mezi elementy po celou tuto dobu, došlo k přesunu většího množství plynu z elementu do jiného elementu, než kolik bylo k dispozici. Taková situace nastávala hlavně při otevírání vrtu.

Odstranění závislosti kroku simulace i její přesnosti na výkonu počítače bylo dosaženo přímým zadáváním od uživatele. Simulace sice nyní vykazovala vždy stejné výsledky pro dané zadání, ale pro odstranění rozkmitání hodnot však bylo nutno v případě potřeby krok simulace dočasně snížit. Proto pokud předběžné výpočty tlaku plynu v elementech naznačovaly rozkmitání, byl krok simulace snížen na potřebnou hodnotu a postupně zvětšován až na hodnotu požadovanou uživatelem.

Automatickým zmenšením kroku simulace byly odstraněny problémy, ale uživatel zadával velikost tohoto kroku, zatímco by bylo vhodnější zadávat přesnost výpočtu. Jako konečný způsob výpočtu kroku simulace byl proto odvozen vztah pro jeho výpočet ze vztahů pro velikost toku plynu mezi elementy. Odvození tohoto vztahu bude uvedeno níže.

Maximální krok simulace musí být stanoven tak, aby množství plynu, jenž je přesunuto z libovolného elementu do jiného sousedního elementu během kroku simulace nezměnilo směr tlakového spádu, tedy aby rozdíl tlaku mezi těmito sousedními elementy byl vlivem tohoto toku nanejvýš vyrovnán, avšak nezměnil znaménko. Takovýto krok simulace zajistí, aby nedocházelo k rozkmitání hodnot tlaku a toku v elementech. Maximální krok simulace je pro každou dvojici sousedních elementů jiný, včetně těch, jimiž prochází vrt. Právě v elementech, kde se nachází vrt, je pravděpodobnost rozkmitání hodnot nejvyšší, neboť odpor vrtu je mnohonásobně menší než odpor elementu. Maximální krok simulace pro celou skládku získáme nalezením nejmenšího maximálního kroku simulace mezi jednotlivými elementy.

Přesnost simulace určuje uživatel zadáním „dělitele kroku simulace“ (DKS). Ten slouží k výpočtu kroku simulace jako dělitel maximálního kroku simulace.

Pro výpočet maximálního kroku simulace mezi elementy vycházím z přesunu právě poloviny množství plynu způsobujícího tlakový rozdíl a z podobnosti sousedních elementů.

Tok plynu udává vztah (7.4). Vynásobením krokem simulace získáme množství plynu přesunutého během kroku simulace:

$$\Delta V_K = \frac{\Delta p \cdot S}{R_m \cdot L_m} \cdot T_K \quad (7.9)$$

kde je ΔV_K - množství plynu přesunutého během kroku simulace [m^3],

Δp - rozdíl tlaku na daném úseku skládky [Pa],

L_m - délka úseku v materiálu (elementu) [m],

R_m - měrný odpor materiálu proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$],

S - plocha, kterou plyn proudí mezi elementy [m^2],

T_K - krok simulace [s].

Spojením vztahů (7.7) a (7.9) zjistíme, jakou změnu tlaku toto množství plynu způsobí:

$$\Delta p_K = \frac{p_{atm}}{V_o} \cdot \frac{\Delta p \cdot S}{R_m \cdot L_m} \cdot T_K \quad (7.10)$$

kde je Δp_K - rozdíl tlaku způsobený plynem přesunutým během kroku simulace [Pa],

p_{atm} - atmosférický tlak [Pa],

V_o - volný objem elementu (součet vzduchových mezer v elementu) [m^3].

Na začátku kapitoly bylo uvedeno, že tlak plynu mezi elementy se má při maximálním kroku simulace T_{Kmax} vyrovnat, to znamená, že způsobená změna tlaku v elementu musí být polovinou z původního rozdílu tlaku mezi elementy:

$$\frac{\Delta p_k}{\Delta p} = \frac{1}{2} \quad (7.11)$$

Dosazením tohoto poměru do vztahu (7.10) získáme

$$\frac{1}{2} = \frac{p_{atm}}{V_o} \cdot \frac{S}{R_m \cdot L_m} \cdot T_{K \max} \quad (7.12)$$

kde je V_o - volný objem elementu (součet vzduchových mezer v elementu) [m³],

$T_{K \max}$ - maximální krok simulace [s].

a odvodíme $T_{K \max}$:

$$T_{K \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_m \cdot L_m \cdot V_o}{p_{atm} \cdot S} \quad (7.13)$$

kde je Δp_K - rozdíl tlaku způsobený plynem přesunutým během kroku simulace [Pa],

p_{atm} - atmosférický tlak [Pa],

V_o - volný objem elementu (součet vzduchových mezer v elementu) [m³].

po dosazení (7.8) získáme:

$$T_{K \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_m \cdot L_m^2 \cdot n_p}{p_{atm}} \quad (7.14)$$

kde je L_m - délka úseku v materiálu (elementu) [m],

n_p - objemová pórovitost [-],

p_{atm} - atmosférický tlak [Pa],

R_m - měrný odpor materiálu proti proudění [kg.m⁻³.s⁻¹],

$T_{K \max}$ - maximální krok simulace [s].

Podobným způsobem můžeme odvodit vztah pro maximální krok simulace pro vrty ze vztahu (7.5), při lineárním proudění dostaneme po úpravě:

$$T_{K \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_o \cdot R_m \cdot L_V}{p_{atm}} \quad (7.15)$$

kde je L_V - délka části vrtu [m],

R_m - měrný odpor materiálu proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$],

V_o - volný objem elementu (včetně vrtu) [m^3].

Zatímco při nelineárním proudění podle vztahu (5.2) získáme po úpravě:

$$T_{K \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{R_m \cdot L_V^3 \cdot \Delta p_V}}{p_{atm}} \quad (7.16)$$

kde je L_V - délka části vrtu [m],

r - poloměr vrtu [m],

R_m - měrný odpor materiálu proti proudění [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$],

V_o - volný objem elementu (včetně vrtu) [m^3].

Ze vztahu (7.16) plyne závislost $T_{K \max}$ také na druhé odmocnině z rozdílu tlaku na daném úseku vrtu. Z toho vyplývá, že nelze stanovit maximální krok simulace pro dané nastavení modelu. Aby byla simulace při stabilní i při simulaci nelineárního proudění ve vrtu, je v modelu použit vztah (7.15) a uživatel musí nastavit velký DKS, řádově tisíce. K simulace by ale potřeboval mnohonásobně rychlejší procesor počítače, než je běžné v současné době.

Algoritmus výpočtu

V době, kdy krok simulace volil uživatel a v případě nebezpečí kmitání hodnot byl tento krok snížen, byly výpočty prováděny dle následujících vztahů po jednotlivých krocích:

- 1) stanovení kroku simulace – časového úseku po který budeme považovat proudící množství za konstantní (co nejmenší),
- 2) dle vztahu (7.4) a (7.5) jsou propočteny jednotlivé toky plynu,
- 3) dle vztahu (7.6) jsou vypočteny objemy plynu v elementech,
- 4) dle vztahu (7.7) jsou zjištěny tlaky v elementech,
- 5) kontrola hodnot tlaku elementů z hlediska kmitání – je-li vše v pořádku, přejde se k bodu 6), dochází-li ke kmitání, je upraven krok simulace a proveden návrat k bodu 1),
- 6) uloží se změny hodnot a pokračuje se opět od bodu 1).

Při konečné podobě volby kroku simulace došlo ke změně v rámci bodů 5) a 6) algoritmu výpočtu a ten nyní kratší:

- 1) stanovení kroku simulace – časového úseku po který budeme považovat proudící množství za konstantní (co nejmenší),
- 2) dle vztahu (7.4) a (7.5) jsou propočteny jednotlivé toky plynu,
- 3) dle vztahu (7.6) jsou vypočteny objemy plynu v elementech,
- 4) dle vztahu (7.7) jsou zjištěny tlaky v elementech,
- 5) uloží se změny hodnot a pokračuje se opět od bodu 2).

7.4 Vlastnosti simulačního programu

Program počítá jednotlivé změny veličin v určitém časovém kroku na základě již výše uvedených vzorců, samotný průběh simulace však řídí sám uživatel. K tomuto má k dispozici několik tlačítek, které jsou zobrazeny pouze, je-li jich v dané chvíli možno použít.

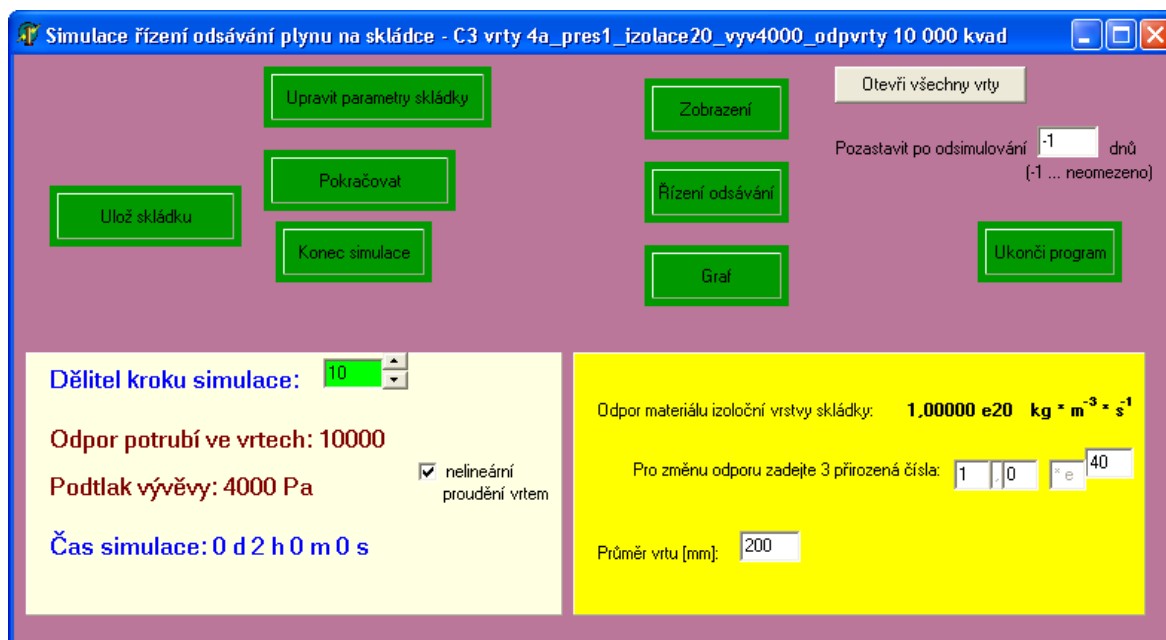
Program počítá s parametry přednastavenými, načtenými (ze souboru) a zadanými uživatelem.

Informace o průběhu simulace jsou zobrazovány podle typu buď v textové nebo grafické podobě. V mnoha případech lze měnit parametry kliknutím na daný prvek, ať už textový nebo grafický.

Úvodní okno programu

V úvodním okně programu máme několik možností ovládání simulace. Na obrázku 7.2 je úvodní okno zobrazeno tlačítka, které jsou k dispozici po načtení uložené simulace. Můžeme zde otevírat a ukládat jednotlivé skládky, měnit jejich parametry, měnit dělitel kroku simulace a zobrazit další okna: „Parametry skládky“, „Zobrazení“, „Řízení odsávání“, „Graf odsávání“ a „Charakteristika vývěvy“.

V úvodním okně je také políčko „ukládat hodnoty odsávání“. Pokud je zaškrtnuto, jsou hodnoty odsávání (množství, koncentrace metanu, atd.) a řízení zaznamenávány do souborů k dalšímu využití pro zobrazení v grafu, jak bude uvedeno u grafu odsávání.



Obr. 7.2 Úvodní okno programu

Zavření tohoto úvodní okna způsobí ukončení aplikace. Zavírání ostatní oken ne.

Okno Parametry skládky

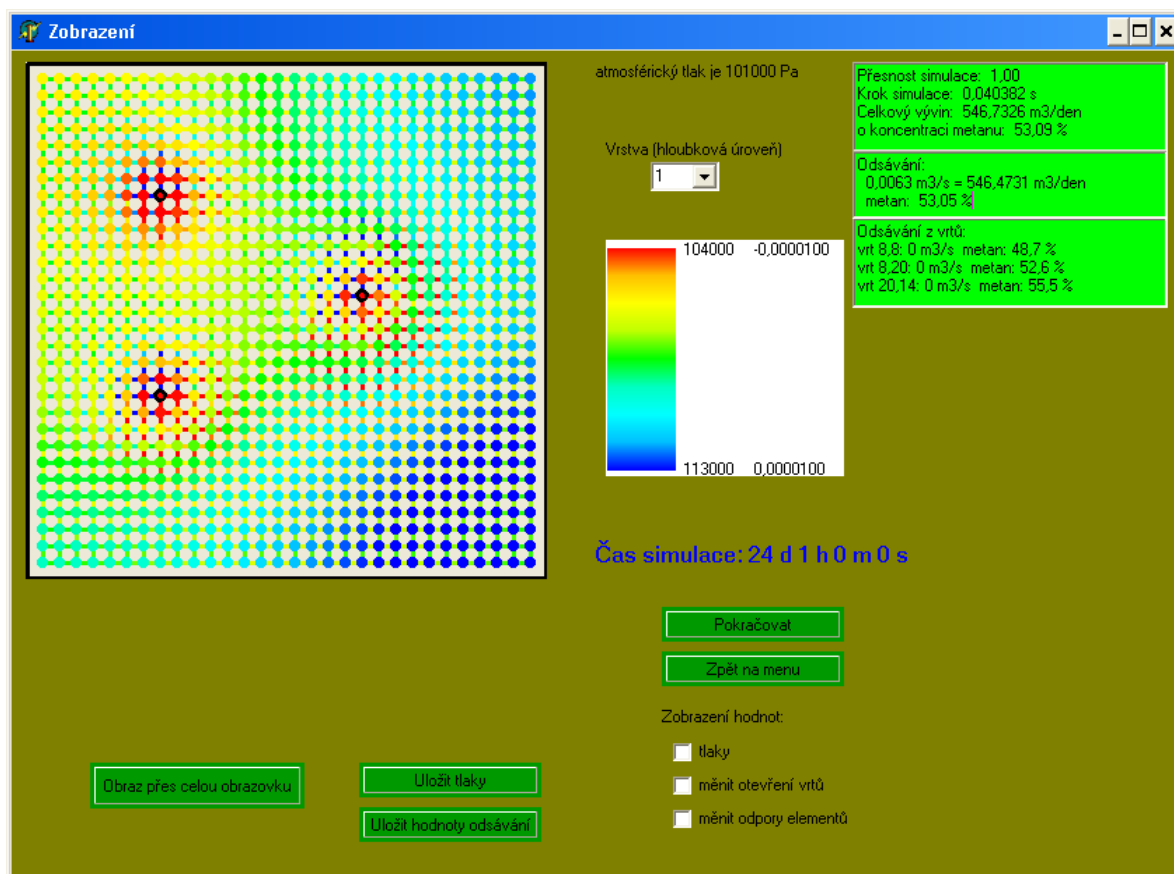
V okně Parametry skládky se nastavuje rozměr skládky, počet elementů, na které bude skládka rozdělena, počet vrtů s jejich rozmístěním a vlastnosti materiálu.

Okno Zobrazení

V okně Zobrazení vidíme většinu informací o aktuálním stavu skládky (viz obrázek 7.3).

Obdélník v zobrazení simulace představuje obvod skládky. Jednotlivé body reprezentují elementy v modelu. Zbarvení bodů je určeno tlakem plynu v elementu. Čáry mezi elementy představují tok plynu a jsou zbarveny podle množství proudícího plynu. Barevná paleta je zobrazena vedle čtyřúhelníku i s přiřazením hodnot. První hodnota je tlak, druhá

protékající množství. Toto číselné přiřazení hodnot lze v průběhu simulace měnit kliknutím na danou hodnotu. Proudící množství je kladné, pokud proudí ve směru osy. To je na obrázku zleva doprava, shora dolů nebo ve směru od vrstvy č. 1 k vrstvě nejspodnější. Uživatel má možnost zvětšit zobrazení skládky dle potřeby, s využitím tlačítka „Obraz přes celou obrazovku“.

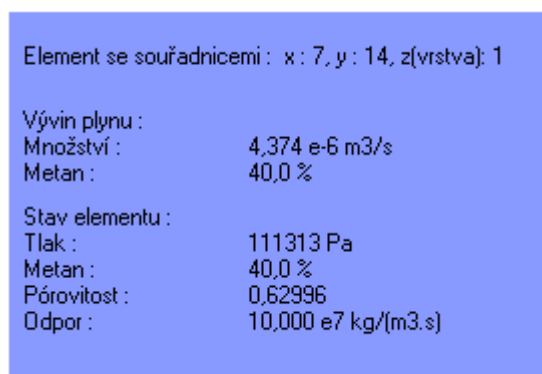


Obr. 7.3 Zobrazení průběhu simulace

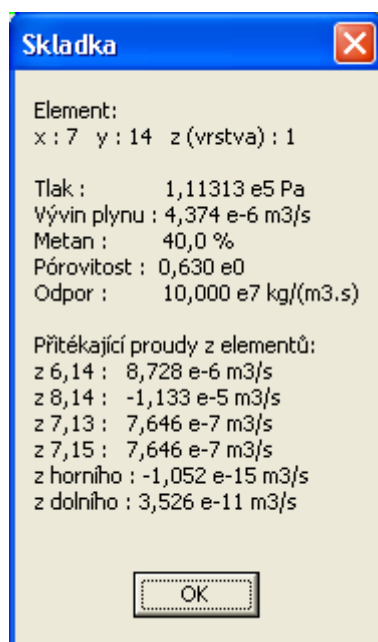
V dané chvíli se vždy zobrazuje jen jedna vrstva elementů, které jsou ve stejné výšce. Výběr zobrazené vrstvy se mění pomocí rozbalovacího menu. Informace o množství odsávaného plynu a koncentraci metanu je zobrazována v pravém horním rohu.

Aktuální informace k libovolnému elementu lze získat dvěma způsoby, z nichž každý zobrazuje nějakou informaci navíc oproti druhému a záměrně je použit jiný způsob

zobrazení informací pro zvýšení přehlednosti. Přesunem myši nad daný element získáme základní informace o stavu elementu, případně vrtu (viz obrázek 7.4). Kliknutím na daný element získáme informace o tocích mezi elementy (viz obrázek 7.5), ale s menší přehledností a horší úpravou (ta je způsobena použitím klasického informačního dialogu).



Obr. 7.4 Zobrazení - informace o elementu při přesunu myši nad ním



Obr. 7.5 Zobrazení - informace o elementu po kliknutí na něj

Tlaky v jednotlivých elementech a hodnoty odsávání lze v průběhu simulace uložit do textových souborů v adresáři, kde se nachází aplikace. Tlaky budou uloženy do souboru

s názvem „tlaky.txt“. Hodnoty odsávání do souboru „odsavani.txt“ - tento soubor se nemaže, proto je možno uložit hodnoty odsávání i několikrát za simulaci a také z různých skládek.

Řízení odsávání

Okno Řízení odsávání (viz obrázek 7.6) slouží k nastavení řízení odsávání skládkového plynu. Jsou zde zobrazeny následující informace o typu a parametrech řízení odsávání s možností změny uživatelem:

- typ řízení odsávání - označuje cíl řízení při odsávání,
- množství sloužící jako žádaná hodnota pro maximalizaci, stabilizaci nebo dodržení minimálního množství,
- odchylka množství udává rozdíl množství v $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ od žádané hodnoty, při které ještě nebude provedena změna v odporu uzávěrů vrtů,
- koncentrace metanu sloužící (podobně jako množství) jako žádaná hodnota pro maximalizaci, stabilizaci nebo dodržení minimálního koncentrace metanu v odsávaném plynu,
- odchylka koncentrace metanu udává rozdíl v koncentraci metanu od žádané hodnoty, při které ještě nebude provedena změna v odporu uzávěrů vrtů,
- krok řízení, který udává, jak často se má řízení provést,
- škrcení - při zavírání (nebo otevírání) vrtu bude odpor uzávěru nastaven o uvedený počet procent větší (nebo menší) než je hodnota aktuální.

Skládka - řízení odsávání

Aktuálně se odsává 5,559 m³/h, s kapacitou metanu 52,508 %

(4) Stabilizace Q i C

Množství: 6 m³/h Koncentrace: 49 % Krok řízení: 120 s
Škrčení: 10 %

Typ řízení odsávání:

- ☐ (0) Bez řízení
- ☐ (1) Maximalizace Q, dodržení C_{min}
- ☐ (2) Dodržení Q_{min}, maximalizace C
- ☐ (3) Q konstantní, maximalizace C
- ☒ (4) Stabilizace Q i C
- ☐ (5) Maximalizace Q, stabilizace C

Množství [m³/h]: 6

Odchylka [m³/h]: 0,2

Koncentrace metanu [%]: 49

Odchylka [%]: 0,2

Krok řízení [s]: 120

Škrčení a otevírání vrtů [%]
z aktuální hodnoty: 10

Potvrdit změnu

Schovat okno

Obr. 7.6 Řízení odsávání

Graf odsávání

Součástí programu Skládka je graf historie skládky. Zde je možné si zobrazit časovou závislost odsávání skládkového plynu. Jsou zaznamenány průběžné hodnoty nejen z hlediska skládky jako celku, ale také jednotlivě pro každý vrt. Také jsou zobrazeny hodnoty úniku plynu a nasávání tělesem skládky. Pro zobrazení lze zvolit ze tří možností: množství, koncentrace metanu nebo uzavření vrtů, viz obrázky 7.7, 7.8 a 7.9. Ke každé možnosti lze v případě potřeby také zobrazit typ řízení.

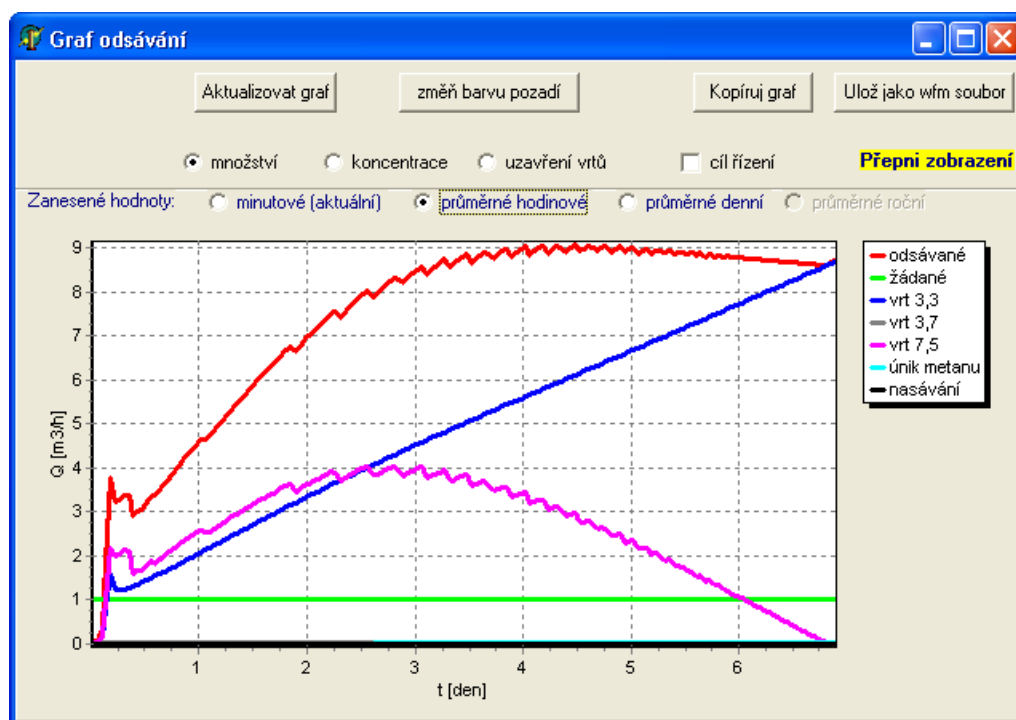
Rozdělení i popis časové osy grafu se mění podle délky simulace, nejprve jsou to minuty, hodiny a nakonec dny. Po najetí kurzoru myši na graf se zobrazí aktuální hodnoty zobrazených veličin v daném čase. Zobrazení jednotlivých křivek lze přepínat tlačítkem „Přepni zobrazení“.

Postupně je tak přepínáno mezi následujícími možnostmi zobrazení křivek:

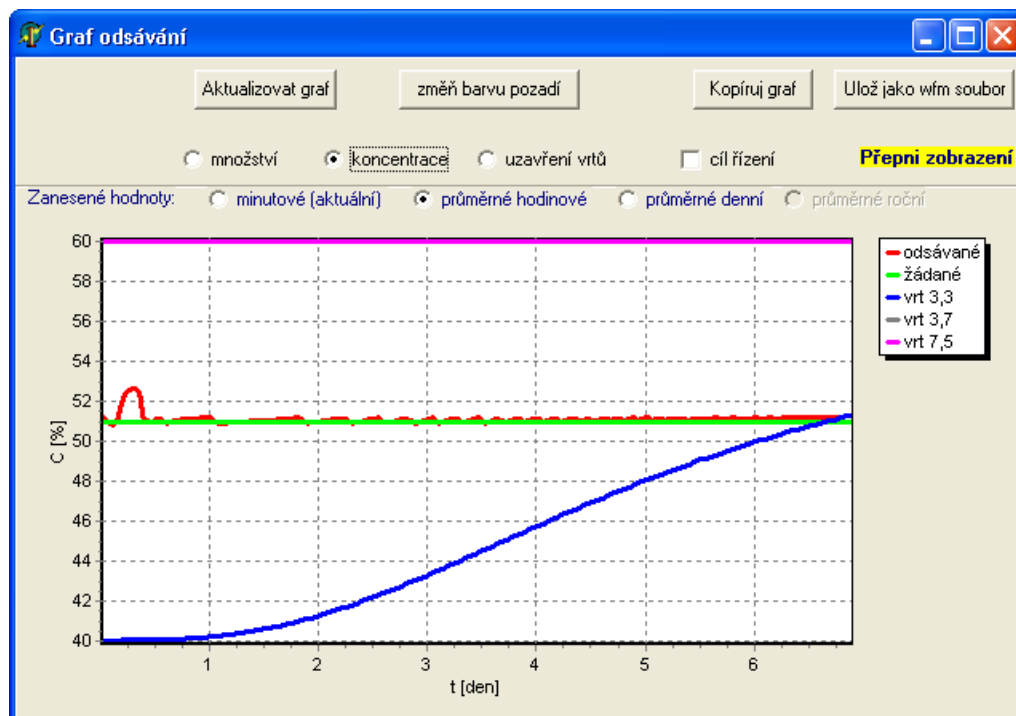
- zobrazeny všechny křivky stejnou tloušťkou čáry,
- zobrazeny všechny křivky, čára pro celkově odsávanou hodnotu má 2-násobnou šířku,
- zobrazena jen křivka pro celkově odsávanou hodnotu (množství nebo koncentrace),
- zobrazeny křivky pro celkově odsávanou a žádanou hodnotu.

Hodnoty pro zobrazení jsou získávány ze souborů „odsáto.txt“, „ods_hod_int.txt“ a „rizeni.txt“, kam byly zapisovány v průběhu simulace. Máme 4 možnosti pro výběr hodnot do grafu z hlediska času, a to: minutové (aktuální), průměrné hodinové, průměrné denní a průměrné roční.

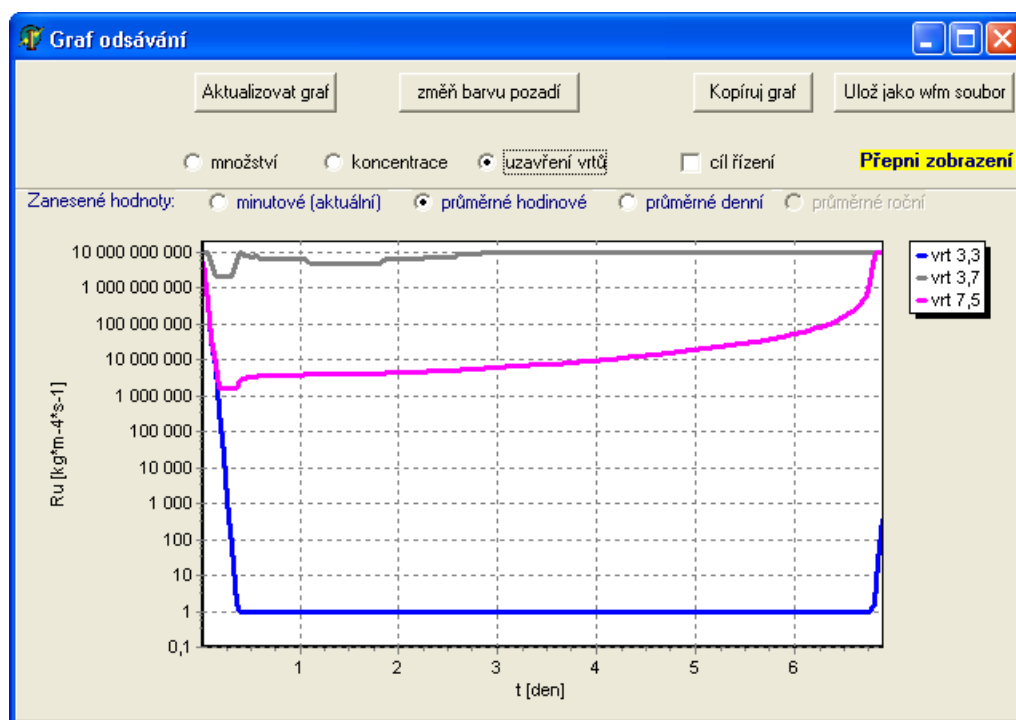
Je třeba si uvědomit, že tyto hodnoty odsávání byly zapisovány jako minutové průměry pro celkové odsávání plynu ze skládky (soubor „odsáto.txt“), avšak jako aktuální hodnoty odsávání na konci každé minuty v případě jednotlivých vrtů (soubor „ods_hod_int.txt“). Proto pokud zvolíme pro zobrazení některý z průměrů, také je tím u vrtů myšleno průměr z aktuálních hodnot na konci každé minuty. Pokud by byly ve všech případech použity průměrné hodnoty za minutu, nebylo by možné z grafu zjistit, že dochází k rychlému kmitání hodnot v odsávaném množství. Tyto soubory jsou textové pro případné další využití a pro simulaci například 1 roku mohou zabírat desítky i stovky MB, podle počtu vrtů.



Obr. 7.7 Ukázka grafu historie – množství



Obr. 7.8 Ukázka grafu historie - koncentrace



Obr. 7.9 Ukázka grafu historie - otevření vrtů

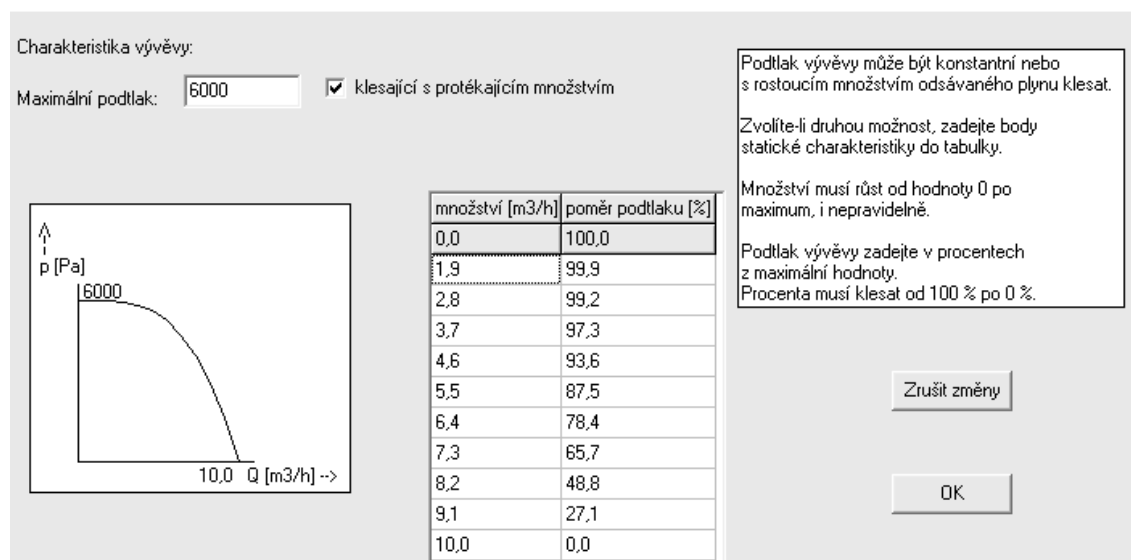
V grafech jsou vždy zaznamenány jen křivky, které mohou mají pro danou volbu význam, s výjimkou křivek pro žádané množství a žádanou koncentraci, které jsou zobrazeny i v případě, že není použito řízení odsávání. Je to z toho důvodu, že v průběhu simulace můžeme cíl řízení měnit.

Rychlost načítání grafu závisí hlavně na délce simulace, ale zobrazení průměrných hodnot je rychlejší než zobrazení minutových hodnot.

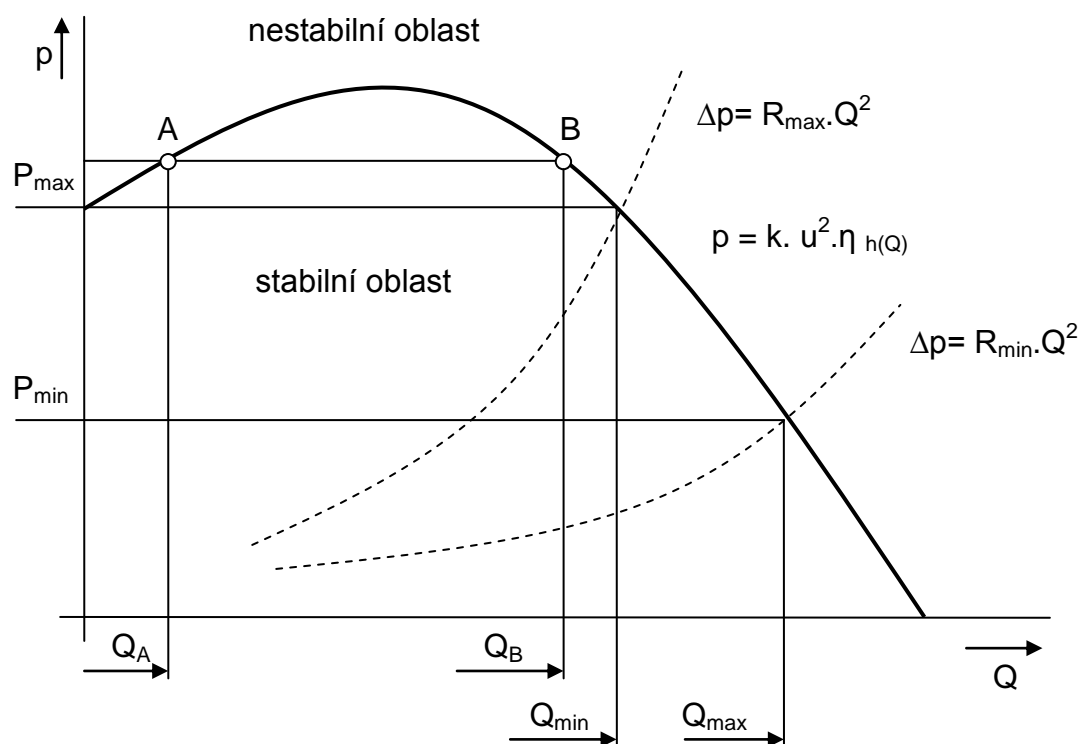
Podtlak vývěvy

Kliknutím na text „Podtlak vývěvy“ v úvodním okně aplikace lze zobrazit charakteristiku vývěvy (viz Obr. 7.10). Podtlak vývěvy je možno zadat jako konstantní, bez ohledu na množství protékajícího plynu nebo nastavit statickou charakteristiku vývěvy tak, že podtlak vývěvy bude s rostoucím množstvím klesat.

Skutečná statická charakteristika vývěvy obsahuje nestabilní oblast (viz Obr. 7.11), avšak vzhledem ke způsobu výpočtu při simulaci byla statická charakteristika zjednodušena.



Obr. 7.10 Nastavení charakteristiky vývěvy



R_{\max} – maximální možný odpor sítě, A,B – příklad pracovních bodů při čerpání mezi objemovým průtokem Q_A a Q_B , Q_{\min} – minimální množství na hranici pumpovní meze, ostatní symboly jsou vysvětleny v textu

Obr. 7.11 Statická charakteristika rotačního lopatkového stroje [Strakoš 1996]

8 Experimenty s modelem

V průběhu tvorby programu Skládka bylo prováděno velké množství simulací, aby mohl být program odladěn a chyby odstraněny. S výsledným programem Skládka pak bylo provedeno několik experimentů (simulací), které jsou uvedeny v následujících podkapitolách. U každého experimentu jsou uvedeny některé z parametrů, určující danou simulaci. Je však nutno mít na paměti, že pro přesné opakování experimentu by bylo zapotřebí zadávat změny v parametrech skládky také zcela přesně v daných okamžicích. Obzvláště se to týká grafu odsávání, neboť hodnoty použité pro vykreslení jsou aktuální hodnoty, které se při změnách v řízení nebo parametrech skládky mohou rychle měnit nebo kmitat.

Pro experimenty byly vytvořeny vzorové příklady a v jednotlivých experimentech je měněn některý z parametrů simulace, na něž se daný experiment zaměřuje. Vzory nejsou navrženy jako reálné hodnoty, ale jako hodnoty vhodné pro simulaci ukázkovou simulaci. Není-li uvedeno jinak, je v experimentu použit vzor skládky č. 1, izolační vrstva materiálu s odporem $R_m = 1 \cdot 10^{40} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^1$ a průměr vrtu 200 mm.

Experimenty s modelem jsou rozděleny do několika částí a každá část se zaměřuje na jiný parametr a jeho vliv na průběh simulace odsávání. V těchto částech je obvykle detailně popsán jeden experiment a další jsou uvedeny souhrnně.

Grafy uvedené v rámci experimentů jsou většinou pro ukázkou záměrně uvedeny v podobě, v jaké jsou výstupem z aplikace. Proto jsou osy grafů často nestandardně popsány.

Hodnoty uvedené jako výstupní hodnoty z experimentů jsou odečítány z grafu přímo v aplikaci a zaokrouhleny na příslušný počet platných číslic, případně počet desetinných míst. Přesto k chybě při odečítání z grafu nedochází, protože program zobrazuje dané hodnoty pro danou minutu číselně, tak jak je vypočítal, jen zaokrouhleny na méně desetinných míst. Hodnoty úniku a nasávání plynu tělesem skládky kmitají více než hodnoty odsávaného plynu, proto byly odečítány z průměrných hodnot za hodinu případně za den.

Vzor skládky č.1

V tomto vzoru (viz tabulka 8.1) je výpočet vlastnosti materiálu v jednotlivých elementech proveden ze všech vzorků podle vzdálenosti, nejbližší vzorek k danému elementu má největší vliv.

Tab. 8.1 Vzor skládky č. 1

Rozměry skládky:	100 x 100 x 10 m
Počet elementů:	10 x 10 x 3
Vlastnosti materiálu:	viz obrázek 8.1
Metoda přepočtu vzorků:	podle vzdálenosti
Rozmístění vrtů:	3 vrty o souřadnicích: 3 x 3, 3 x 7, 7 x 5
Celkový vývin:	408,5 m ³ .den ⁻¹ , to je 17,02 m ³ .h ⁻¹ , koncentrace metanu 53,28 %

Vlastnosti materiálu

Přidat Zadat blokově

Způsob přepočtu na elementy : ☒ ze všech vzorků podle vzdálenosti
☐ z nejbližšího vzorku

	souřadnice			množství plynu	pórovitost	odpor	koncentrace metanu
	x	y	z	[m ³ / (m ³ . den)]	[-]	[kg . m ⁻³ . s ⁻¹]	[%]
1	10,00	10,00	2,00	0,00100000	0,1643	100000000	0,400
2	60,00	50,00	7,00	0,01000000	0,2530	50000000	0,600

Obr. 8.1 Vlastnosti materiálu č. 1 – 3

Vzor skládky č. 2

Vzor č.2 (viz tabulka 8.2) je stejný jako vzor č.1, ale pro výpočet vlastností elementů používá pouze nejbližší vzorek materiálu.

Tab. 8.2 Vzor skládky č. 2

Rozměry skládky:	100 x 100 x 10 m
Počet elementů:	10 x 10 x 3
Vlastnosti materiálu:	viz obrázek 8.1
Metoda přepočtu vzorků:	z nejbližšího vzorku
Rozmístění vrtů:	3 vrty o souřadnicích: 3 x 3, 3 x 7, 7 x 5
Celkový vývin:	513,8 m ³ .den ⁻¹ , to je 21,41 m ³ .h ⁻¹ , koncentrace metanu 59,54 %

Vzor skládky č. 3

Tento vzor (viz tabulka 8.3) se od vzoru č.1 liší pětinasobkem počtu elementů a jiným rozmístěním vrtů v elementech tak, aby byly ve stejném místě jako v předchozím vzoru. Současně se mění také celkové množství a koncentrace plynu vznikajícího na skládce.

Tab. 8.3 Vzor skládky č. 3

Rozměry skládky:	100 x 100 x 10 m
Počet elementů:	30 x 30 x 9
Vlastnosti materiálu:	viz obrázek 8.1
Metoda přepočtu vzorků:	podle vzdálenosti
Rozmístění vrtů:	3 vrty o souřadnicích: 8 x 8, 8 x 20, 20 x 14
Celkový vývin:	546,7 m ³ .den ⁻¹ , to je 22,8 m ³ .h ⁻¹ , koncentrace metanu 53,09 %

Vzory skládky č. 4 – 7

Vzory č. 4 – 7 jsou dány jen vlastnostmi materiálu, další parametry skládky se mohou v experimentech měnit. Vlastnosti materiálu pro vzor č. 4 jsou na obrázku 8.2 a pro vzor č. 5 na obrázku 8.3.

Vlastnosti materiálu

Přidat Zadat blokově

Způsob přepočtu na elementy : ☐ ze všech vzorků podle vzdálenosti
☒ z nejbližšího vzorku

	souřadnice			množství plynu	pórovitost	odpor	koncentrace metanu
	x	y	z	[m ³ / (m ³ · den)]	[-]	[kg · m ⁻³ · s ⁻¹]	[%]
1	10,00	10,00	2,00	0,04928000	0,1643	100000000	0,500

Obr. 8.2 Vlastnosti materiálu č. 4

Vlastnosti materiálu

Přidat Zadat blokově

Způsob přepočtu na elementy : ☒ ze všech vzorků podle vzdálenosti
☐ z nejbližšího vzorku

	souřadnice			množství plynu	pórovitost	odpor	koncentrace metanu
	x	y	z	[m ³ / (m ³ · den)]	[-]	[kg · m ⁻³ · s ⁻¹]	[%]
1	10,00	10,00	2,00	0,01185186	0,5000	100000000	0,400

Obr. 8.3 Vlastnosti materiálu č. 5

Vzor č. 6 má poloviční odpor materiálu než č. 5, to je $5 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.

Vzor č. 7 liší od vzoru č. 5 pórovitostí, která je rovna 0,75.

Rozložení vrtů

V experimentech je použita zkrácená forma rozložení vrtů podle tabulky 8.4, kde první číslo znamená počet vrtů, písmeno způsob rozložení a druhé číslo se použije v případě stejného rozmístění vrtů do skládky s vyšším počtem elementů.

Tab. 8.4 Rozložení vrtů

Označení	Rozložení vrtů v elementech
1A	5 x 10
1A2	10 x 20
1B	5 x 5
1B2	14 x 14
2A	5 x 6, 6 x 15
2A2	10 x 11, 11 x 30
4A	3 x 5, 8 x 7, 3 x 14, 8 x 16
4A2	9 x 9, 19 x 9, 9 x 19, 19 x 19

8.1 První kontrolní experiment s ustálením

Jako první je v práci uveden experiment s otevřenými vrty, který sleduje průběh a ustálení odsávaného množství a koncentrace metanu. Simulace je spuštěna s nastaveným dělitelem kroku simulace 1, což je hranice, při které je ještě zajištěna stabilní simulace.

Parametry experimentu

Parametry experimentu jsou:

- uzavření vrtů: všechny vrty otevřeny, odpor uzávěrů je $1 \text{ kg.m}^{-4}.\text{s}^{-1}$,
- odpor potrubí vrtů: $4000 \text{ kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 1000 Pa,
- DKS: 1.

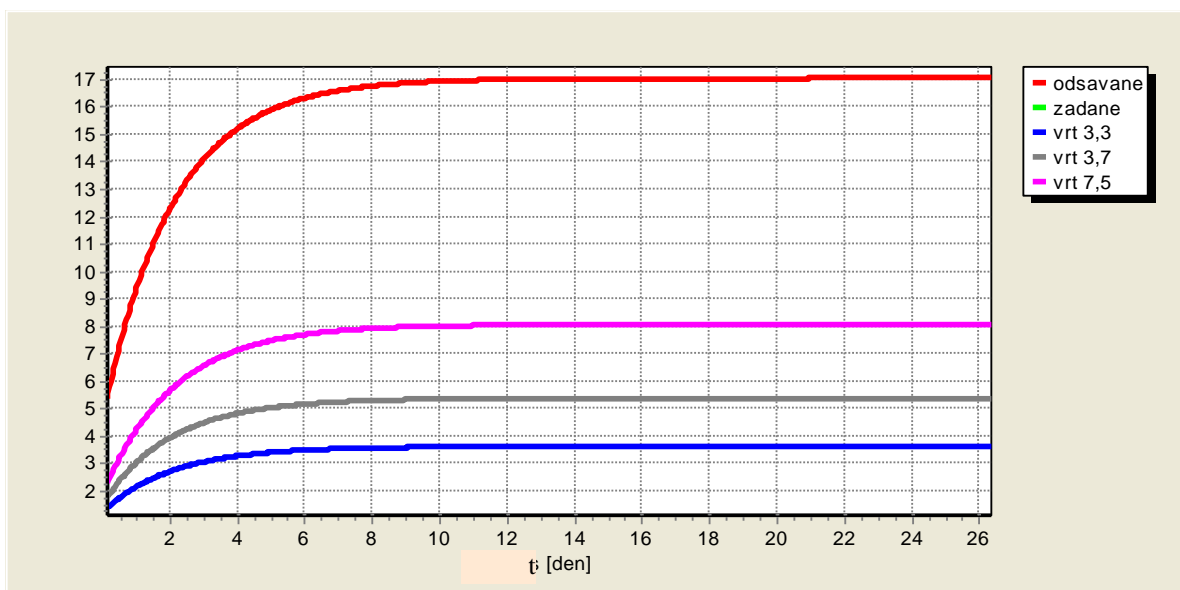
Průběh experimentu

Simulace probíhala rychle vzhledem k malému počtu elementů, nízkému DKS a relativně velkému kroku simulace vzhledem k vyššímu odporu potrubí ve vrtech. K ustálení množství odsávaného plynu dochází v průběhu druhého týdne odsávání (viz obrázek 8.4). Hodnoty 99 % celkového vývinu, tedy $16,85 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, je dosaženo 9. den. Proces ustálení koncentrace metanu v odsávaném plynu trval déle (na hodnotu 53,28 % 150 dnů), přestože jeho absolutní hodnoty se průběhu celé simulace odchylovaly méně než 1 procento. Avšak na konci 2. týdne je její hodnota 53,33 %, tedy odchylka 0,05 %, což představuje relativní odchylku 0,1 % od celkové koncentrace metanu uvolňovaného z materiálu uloženého na skládce. Tlakové pole na obrázku 8.7 znázorňuje rozložení tlaku ve skládce po 24 dnech. Při simulaci delší než 24 dnů se již tlakové pole nezměnilo.

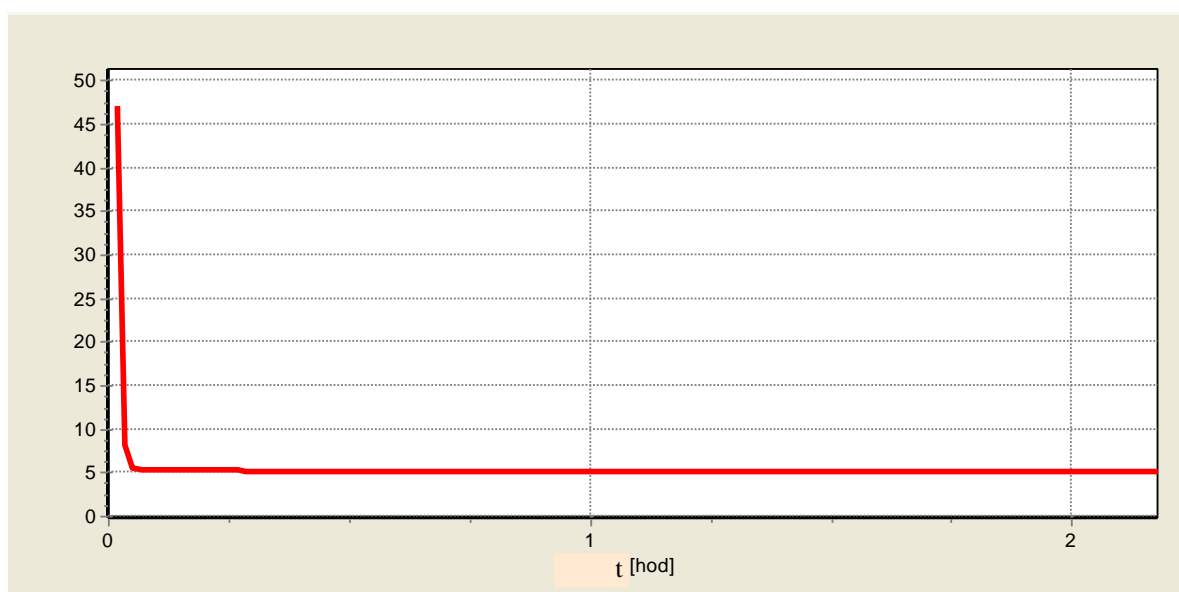
Na obrázku 8.4 není vidět velké množství plynu, které bylo na počátku simulace odsáváno a které dosahovalo mnohonásobku ustáleného množství odsávaného na konci simulace. Je však zachyceno na grafu z počátku simulace, viz obrázek 8.5.

Množství unikajícího plynu tělesem skládky velmi kmitalo, ale na grafu to není možné vidět. Ke kmitání dochází i po ustálení odsávání. Unik se ustálil na $2,4 \text{ e}^{-24} \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

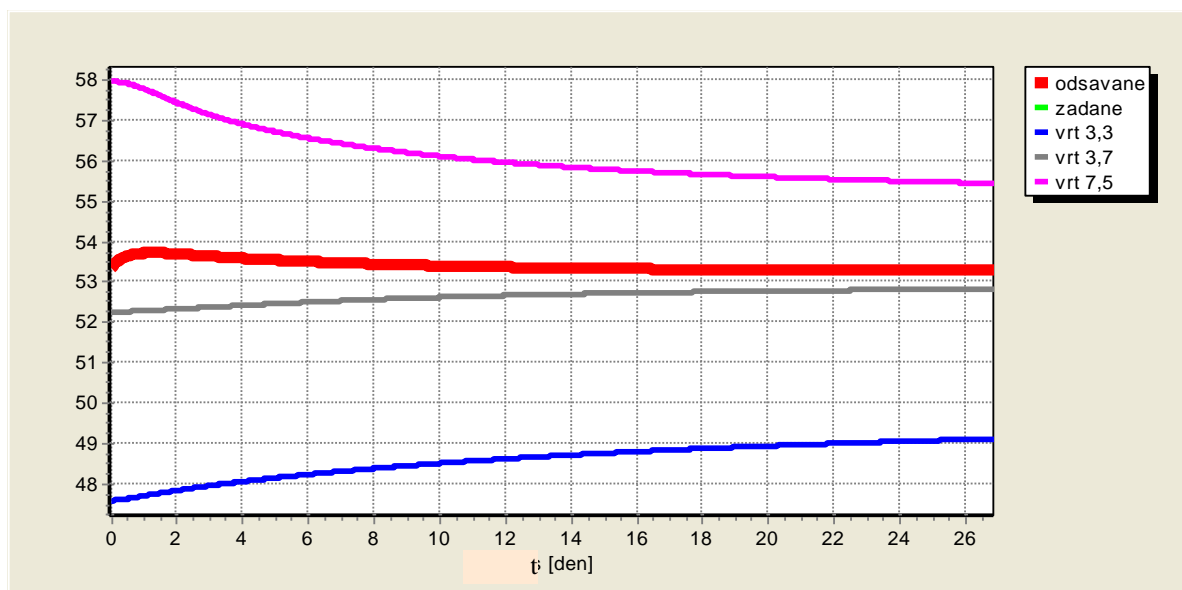
(Poznámka: K dosažení otevření vrtů již během 1. sekundy, nastavíme vysoký DKS, např. 10000, spustíme a pozastavíme simulaci, změníme odpory uzávěrů vrtů a DKS)



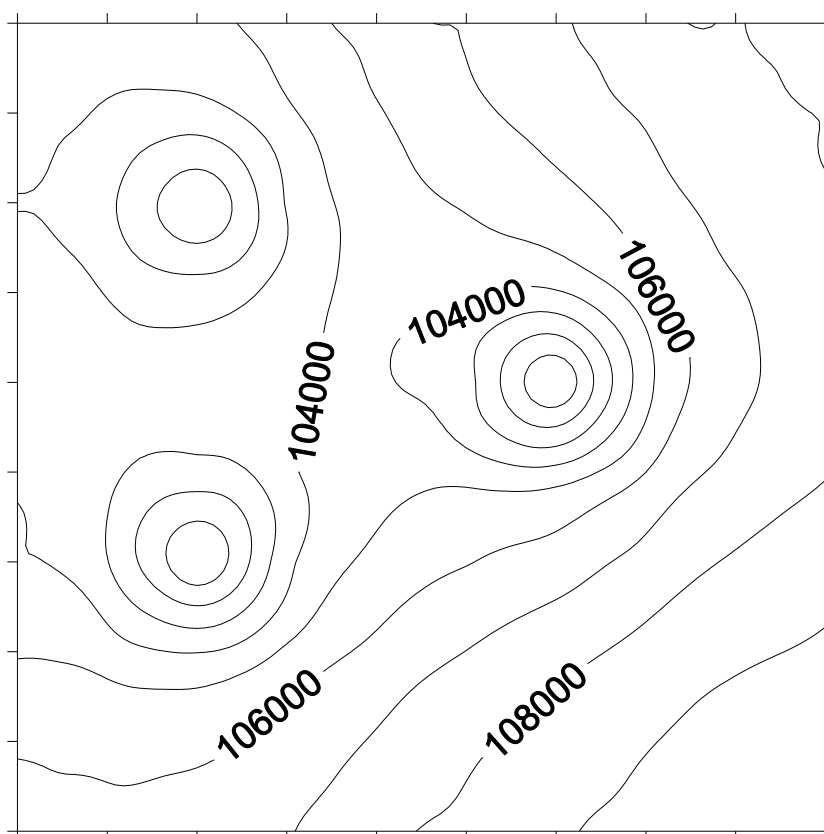
Obr. 8.4 Kontrolní experiment s ustálením - množství



Obr. 8.5 Kontrolní experiment s ustálením - množství, počátek



Obr. 8.6 Kontrolní experiment s ustálením - koncentrace metanu



Obr. 8.7 Kontrolní experiment s ustálením - tlakové pole po 24 hodinách

Zhodnocení experimentu

Značné množství plynu, které se odsávalo v první minutě simulace je způsobeno počátečním odsátím plynu vývěvou z vrtu, který má několikanásobně více volného prostoru ve srovnání s elementy bez vrtu. Na reálné skládce by situace byla jiná, neboť s růstem odsávaného množství klesá podtlak vývěvy, jak je vidět v experimentu s charakteristikou podtlaku vývěvy.

Po odsátí plynu z vrtu kleslo odsávané množství téměř k nule a poté se postupně začalo zvyšovat. Graf závislosti odsávaného množství na čase má tvar přechodové charakteristiky proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu. To je dáno tím, že na začátku simulace, kdy byl v celém prostoru skládky tlak plynu roven atmosférickému tlaku, se tlak plynu rychle zvyšoval, čím docházelo ke zvyšování odsávaného množství, které zpětně zpomalovalo nárůst tlaku ve skládce. Nakonec došlo k ustálení odsávaného množství i rozložení tlaku ve skládce.

Únik plynu tělesem skládky byl při daných parametrech zanedbatelný, to bylo způsobeno izolací s velmi vysokým odporem proti proudění. K vnikání plynu do skládky vlivem odsávání nedošlo.

8.2 Vliv dělitele kroku simulace

V tomto experimentu je ověřován volby DKS na vývoj odsávání na skládce. Zvětšování DKS zmenšuje krok simulace, čím zmenšuje rozsah kmitání hodnot a zvyšuje stabilitu simulace. Předpokladem je, že zvětšením DKS dojde ke zpřesnění průběhu simulace.

V první části je použita skládka jako u prvního kontrolního experimentu, ale DKS byl nastaven na hodnotu 1000.

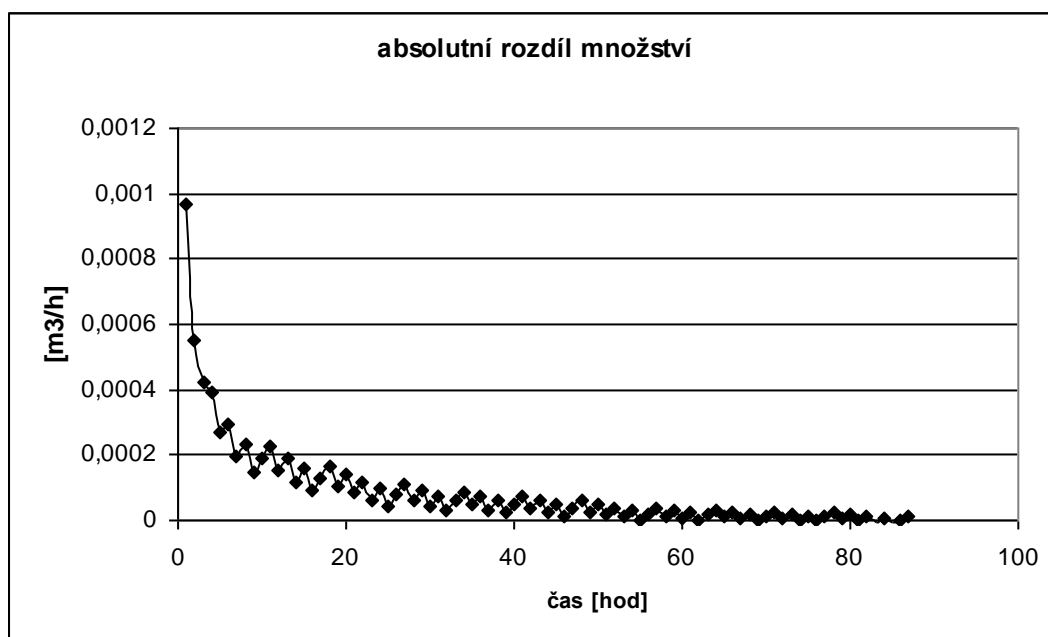
Parametry experimentu

Parametry experimentu jsou:

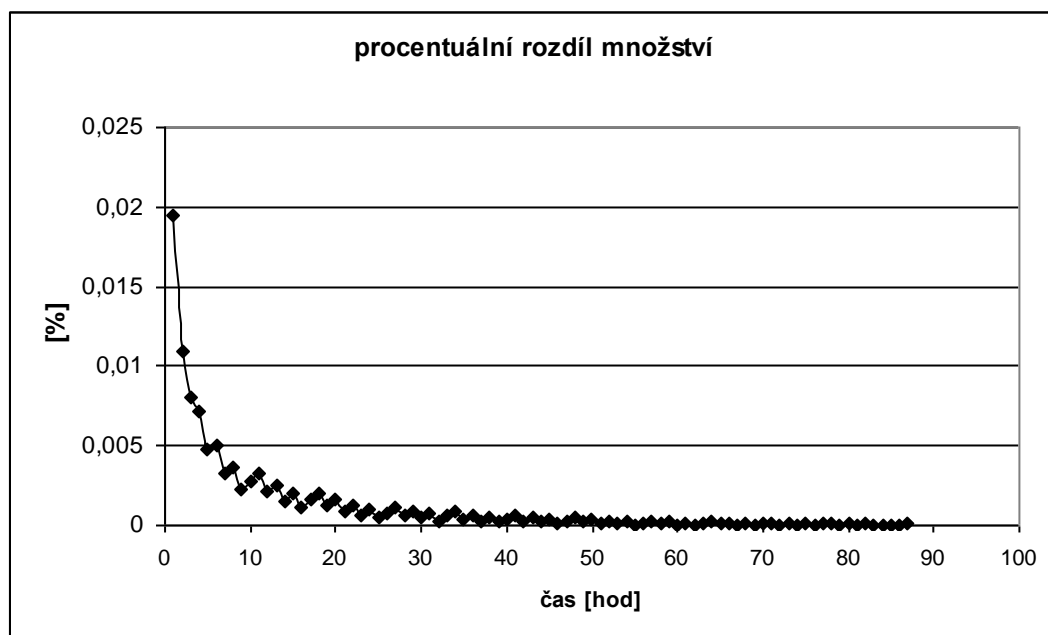
- uzavření vrtů: všechny vrty otevřeny, odpor nastaven na $1 \text{ kg.m}^{-4}.\text{s}^{-1}$,
- odpor potrubí vrtů: $4000 \text{ kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 1000 Pa,
- DKS: 1000.

Průběh experimentu

Graf vývoje na skládce vypadal stejně jako v prvním (kontrolním) experimentu. Odsávané hodnoty však byly po celou dobu simulace nepatrně vyšší, v průběhu ustalování se rozdíl snižoval (viz obrázek 8.8). Po první minutě simulovaného času byl tento rozdíl 32,5 %, v okamžiku 1 hodina byl rozdíl 0,1 %, o 23 hodin později (na konci 1. dne) se jednalo o 0,01 % a po 3. dnu byla odchylka polovina z milióntiny (0,00005 %). Tento průběh rozdílu proti kontrolnímu experimentu je znázorněn na obrázku 8.9.



Obr. 8.8 Krok simulace – absolutní rozdíl množství



Obr. 8.9 Krok simulace – procentuální rozdíl množství

Zhodnocení experimentu

Z tohoto experimentu vyplývá, že DKS na ustalování má zanedbatelný vliv, protože k dosažení stejné hodnoty odsávaného množství při simulaci s DKS rovno 1 došlo jen o řádově sekundy později než při simulaci s DKS rovno 1000. Vliv na absolutní chybu v množství plynu při odsávání s nižším DKS mají tedy velké a časté skokové změny. To může nastat v případech automatického řízení odsávání, pokud je nastavena velká hodnota škrcení a malý krok řízení.

Další experimenty

Pro další experimenty byly zvoleny následující společné parametry:

- vzor skládky č.: 4,
- rozměr skládky: 50 x 100 x 6 m,
- počet elementů: 10 x 20 x 3,
- odpor izolační vrstvy: $10^{20} \text{ kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$,
- celkový vývin plynu: $40 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$,
- koncentrace metanu: 50 % v celém tělese skládky.

Další vstupní parametry jsou v tabulce 8.5, výsledné hodnoty ustálení v okamžiku odsávání 99 % (případně 101 % při aproximaci shora) z množství plynu vyvíjeného ve skládce jsou v tabulce 8.6.

Tab. 8.5 Vliv DKS - vstupní parametry

Číslo exp.	DKS	Krok simulace [s]	Podtlak [Pa]	Měrný odpor vrtů [$\text{kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$]	Vrty
1	1	0,0399	4000	1 000	4A
2	10	0,00399	4000	1 000	4A
3	1	0,399	2000	10 000	1A
4	10	0,0399	2000	10 000	1A
5	1	0,399	2000	10 000	2A
6	10	0,0399	2000	10 000	2A
7	1	0,399	4000	10 000	1A
8	10	0,0399	4000	10 000	1A
9	1	0,399	4000	10 000	4A
10	10	0,0399	4000	10 000	4A
11	50	0,00798	4000	10 000	4A

Tab. 8.6 Vliv DKS - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % odsávaného množství

Číslo exp.	DKS	Odsávané množství [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Čas [h]	Únik CH_4 [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Relativní únik CH_4 [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Sání [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Relativní sání [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Odsávání v 1. min. [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]
1	1	40,4	8,05	0	0	6,3E-10	1,6E-11	249,37
2	10	40,4	8,05	0	0	6,3E-10	1,6E-11	249,36
3	1	39,6	45,95	5,2E-04	1,3E-05	0	0	29,68
4	10	39,6	45,95	5,2E-04	1,3E-05	0	0	29,68
5	1	39,6	17,83	1,5E-04	3,8E-06	0	0	59,37
6	10	39,6	17,83	1,5E-04	3,8E-06	0	0	59,36
7	1	39,6	43,9	4,1E-04	1,0E-05	0	0	59,10
8	10	39,6	43,9	4,2E-04	1,0E-05	0	0	59,13
9	1	40,4	8,1	0	0	6,1E-10	1,5E-11	236,53
10	10	40,4	8,1	0	0	6,1E-10	1,5E-11	236,51
11	50	40,4	8,1	0	0	6,1E-10	1,5E-11	236,51

Dílčí zhodnocení:

Porovnáním výsledků dvojic experimentů se stejnými vstupními parametry (viz tabulka 8.6) a o jeden řád rozdílným DKS (dvojice následují za sebou: 1 a 2, 3 a 4, ...) bylo zjištěno, že rozdíly v čase ustálení odsávaného množství na 99 % z množství vznikajícího plynu, relativním množstvím metanu uniklého ze skládky (množství uniklého metanu na jednotku množství celkového vývinu) a relativním sání jsou nulové. Rozdíly jsou pouze v množství odsávaného plynu během první minuty, maximální rozdíl je u experimentů s čísly 7 a 8, a to 0,05 %. U experimentů č. 9 a 10 je rozdíl 0,008 %, při dalším zvětšení DKS experimentem č. 11 je rozdíl mezi všemi výslednými hodnotami odsávání u experimentů č. 10 a 11 nulový. Simulace s $DKS = 1$ byly v těchto experimentech dostatečně přesné pro jakékoliv závěry ohledně množství odsávaného nebo unikajícího plynu. Simulace s $DKS < 1$ nebyly zahrnuty v uvedených experimentech, k chybě při simulaci dochází při různých hodnotách < 1 v závislosti na dalších parametrech simulace.

Z experimentů vyplývá, že vliv DKS je zanedbatelný i při použití $DKS = 1$.

8.3 Vliv počtu elementů

Rozdělování skládky na více elementů způsobuje zmenšení velikosti elementů, a tím rozdělení stejné vzdálenosti na více elementů. Předpokladem je, že zvýšením počtu elementů ve skládce dojde ke zpřesnění průběhu simulace. Zvýšení celkového vývinu po zvýšení počtu elementů je způsobeno při přepočtu materiálu na více elementů.

V první části je použita skládka jako u prvního kontrolního experimentu s rozdílným rozložením skládky na elementy (30 x 30 x 9) a rozložením vrtů (8 x 8, 8 x 20, 20 x 14).

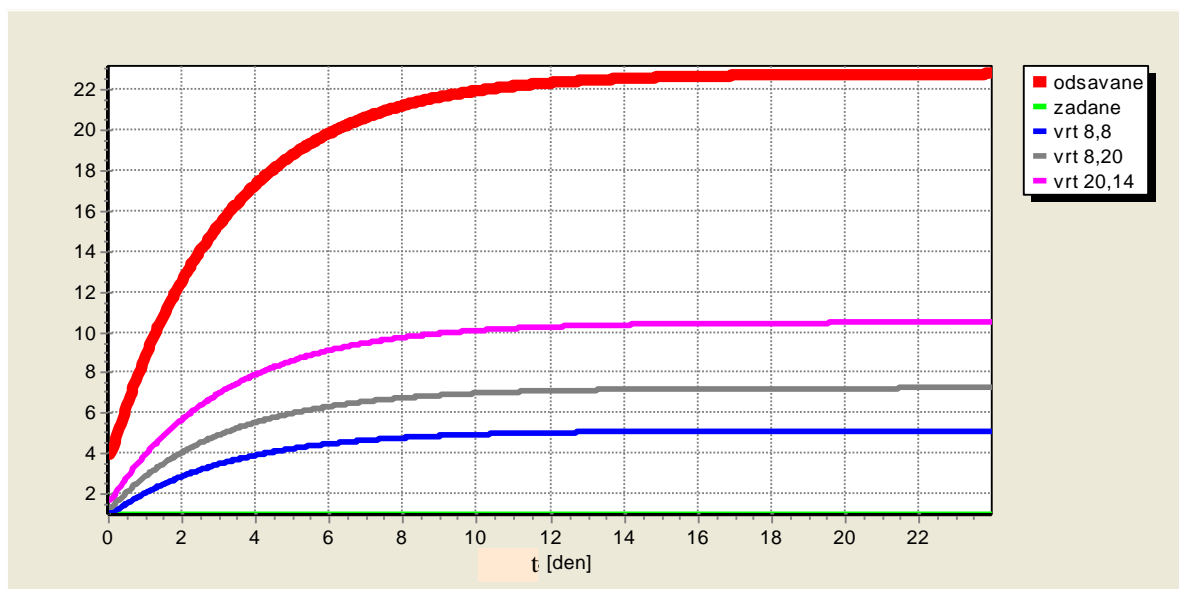
Parametry experimentu

Parametry experimentu v první části jsou:

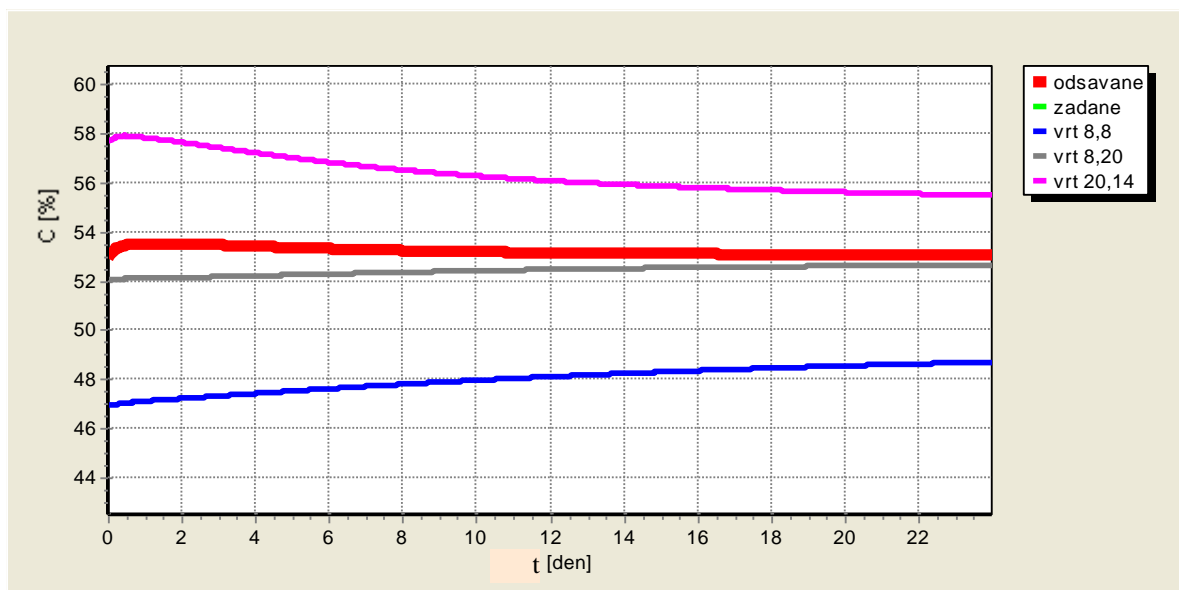
- vzor skládky č.: 3,
- uzavření vrtů: všechny vrty otevřeny, odpor uzávěrů $1 \text{ kg.m}^{-4}.\text{s}^{-1}$,
- odpor potrubí vrtů: $4000 \text{ kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 1000 Pa,
- DKS: 1.

Průběh experimentu

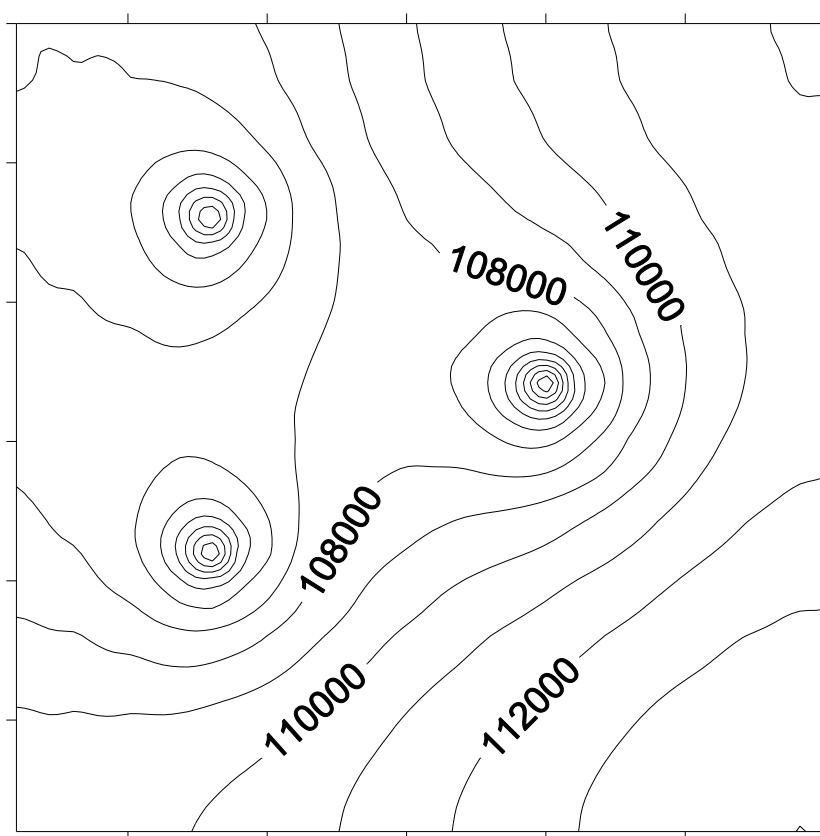
Odsávaného množství ve výši 99 % z množství vyvíjeného na skládce, tedy $22,6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, bylo dosaženo v 15. den. Průběh simulace je znázorněn na obrázcích 8.10 a 8.11. Výsledné tlakové pole je zachyceno na obrázku 8.12.



Obr. 8.10 Počet elementů - množství



Obr. 8.11 Počet elementů - koncentrace metanu



Obr. 8.12 Počet elementů - tlakové pole po 24 dnech

Zhodnocení experimentu

Proces ustálení trval podstatně déle než v prvním kontrolním experimentu. Tlakové pole vykazuje dvojnásobný tlakový spád v okolí vrtů.

Další experimenty

Dále byly zvoleny experimenty (viz tabulka 8.7) s následujícími společnými parametry:

- odpor izolační vrstvy: $10^{20} \text{ kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$,
- měrný odpor vrtů R_{mv} : $10000 \text{ kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$,
- DKS: 1.

Tab. 8.7 Vliv počtu elementů - vstupní parametry

Číslo exp.	Vzor skládky	KS [s]	Podtlak [Pa]	Elementy	Rozměry	Vrty	Celkový vývin plynu [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]
1	5	15,475	4000	9 x 9 x 3	100 x 100 x 10	1C	30
2	5	1,978	4000	27 x 27 x 3	100 x 100 x 10	1C2	34,44
3	6	15,475	4000	9 x 9 x 3	100 x 100 x 10	1C	30
4	6	1,978	4000	27 x 27 x 3	100 x 100 x 10	1C2	34,44
5	7	23,208	4000	9 x 9 x 3	100 x 100 x 10	1C	30
6	7	2,962	4000	27 x 27 x 3	100 x 100 x 10	1C2	34,44
7	4	0,399	2000	10 x 20 x 3	50 x 100 x 6	1A	40
8	4	0,03566	2000	20 x 40 x 6	50 x 100 x 6	1A2	49,06
9	4	0,399	4000	10 x 20 x 3	50 x 100 x 6	1A	40
10	4	0,03566	4000	20 x 40 x 6	50 x 100 x 6	1A2	49,06
11	4	0,399	4000	10 x 20 x 3	50 x 100 x 6	2A	40
12	4	0,03566	4000	20 x 40 x 6	50 x 100 x 6	2A2	49,06

Tab. 8.8 Vliv počtu elementů - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % ods. množství

Číslo exp.	Celkový vývin plynu [m ³ .h ⁻¹]	Odsávané množství [m ³ .h ⁻¹]	Čas [h]	Únik CH ₄ [m ³ .h ⁻¹]	Relativní únik CH ₄ [m ³ .h ⁻¹]	Sání [m ³ .h ⁻¹]	Relativní sání [m ³ .h ⁻¹]	Odsávání v 1. min. [m ³ .h ⁻¹]
1	30	29,7	2060,4	6,8E-09	2,3E-10	0	0	346
2	34,44	34,1	3396	1,6E-08	4,6E-10	0	0	111,5
3	30	29,7	1014,3	3,1E-09	1,0E-10	0	0	346,6
4	34,44	34,1	1684,7	7,7E-09	2,2E-10	0	0	113,4
5	30	29,7	3090,3	6,3E-09	2,1E-10	0	0	399
6	34,44	34,1	5094	1,6E-08	4,6E-10	0	0	153,1
7	40	39,6	45,95	5,2E-04	1,3E-05	0	0	29,68
8	49,06	48,57	59,45	1,4E-03	2,9E-05	0	0	17,55
9	40	39,6	43,9	4,1E-04	1,0E-05	0	0	59,1
10	49,06	48,57	57,52	1,2E-03	2,4E-05	0	0	34,99
11	40	39,6	14,1	6,0E-05	1,5E-06	1,5E-11	3,8E-13	118,27
12	49,06	48,57	21,72	2,7E-04	5,5E-06	4,6E-12	9,4E-14	69,97

Dílčí zhodnocení:

Z experimentů vyplývá (viz tabulka 8.8), že počet elementů na který je skládka rozdělena má zásadní význam. V dvojicích následujících v tabulce za sebou došlo vždy k znásobení počtu elementů na 8 nebo 9 krát. Došlo tak ke zmenšení kroku simulace přibližně o jeden řád, ale ten na výsledné hodnoty nemá tak zásadní význam, jak jsme ukázali v předchozím experimentu. Některé hodnoty jako například relativní únik jsou až několikanásobně větší. Dá se předpokládat, že při dalším zvyšování počtu elementů bude tento vliv klesat, ale již simulace jednoho ustálení odsávání při rozdělení skládky na 4800 elementů (20 x 40 x 6) probíhalo na běžném počítači při tomto experimentování i několik dnů, a to byly parametry skládky voleny záměrně tak, aby simulace probíhala rychleji. Takováto simulace tedy klade velmi vysoké nároky na výkon počítače.

8.4 Vliv odporu materiálu

Předpokladem je, že odpor materiálu významně ovlivňuje proudění ve skládce. V následujících experimentech proto mezi příslušnými dvojicemi dochází k poklesu odporu materiálu na polovinu, ale pórovitost zůstává stejná.

Byly zvoleny experimenty s následujícími společnými parametry (tab. 8.9):

- rozměr skládky: 100 x 100 x 10,
- odpor izolační vrstvy: $10^{20} \text{ kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$,
- měrný odpor vrtů R_{mv} : $10000 \text{ kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 4000 Pa,
- DKS: 1;
- koncentrace metanu: 40 % v celém tělese skládky.

Dílčí zhodnocení:

Z uvedených dvojic v tabulce vyplývá, že zmenšením odporu materiálu na 50% se u experimentů 1 – 4 zkrátí také čas simulace na polovinu (49 – 50 %) a snížil únik plynu (na 46 – 48 %). U experimentů číslo 5 a 6 k ještě rychlejšímu ustálení (46 %), většímu poklesu úniku a současně zmenšení odporu materiálu způsobilo u experimentu číslo 6 nasávání (viz tabulka 8.10). Důvodem nasávání a poklesu úniku je zvětšení dosahu vrtů díky zmenšení odporu materiálu, který způsobil, že 4 vrty na dané skládce bylo hodně.

Tab. 8.9 Vliv materiálu - vstupní parametry

Číslo exp.	Vzor skládky	KS [s]	elementy	vrty	Celkový vývin plynu [m ³ .h ⁻¹]	Odpor materiálu [kg.m ⁻³ .s ⁻¹]
1	5	15,475	9 x 9 x 3	1B	30	100000
2	6	15,475	9 x 9 x 3	1B	30	50000
3	5	1,978	27 x 27 x 3	1B2	34,44	100000
4	6	1,978	27 x 27 x 3	1B2	34,44	50000
5	5	1,978	27 x 27 x 3	4A2	34,44	100000
6	6	1,978	27 x 27 x 3	4A2	34,44	50000

Tab. 8.10 Vliv materiálu - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % ods. množství

Číslo exp.	Odsávané množství [m ³ .h ⁻¹]	Čas [h]	Únik CH ₄ [m ³ .h ⁻¹]	Relativní únik CH ₄ [m ³ .h ⁻¹]	Sání [m ³ .h ⁻¹]	Relativní sání [m ³ .h ⁻¹]	Odsávání v 1. min. [m ³ .h ⁻¹]
1	29,7	2060,4	6,8E-09	2,3E-10	0	0	346
2	29,7	1014,3	3,1E-09	1,0E-10	0	0	346,6
3	34,1	3396	1,6E-08	4,6E-10	0	0	111,5
4	34,1	1684,7	7,7E-09	2,2E-10	0	0	113,4
5	34,1	721	2,8E-09	8,1E-11	0	0	446
6	34,1	331,1	9,7E-10	2,8E-11	9,0E-13	2,6E-14	453,7

8.5 Vliv odporu vrtů

V těchto experimentech byla snaha zjistit vliv odporu potrubí vrtů na průběh simulace. Předpoklad je, že vliv se nebude velmi projevovat, protože vzhledem k odporu odpadového materiálu je odpor vrtů mnohonásobně menší.

K experimentování je v první části využit stejný příklad jako v prvním kontrolním experimentu, jen odpor potrubí vrtů je nastaven 40krát menší.

Parametry experimentu

- Uzavření vrtů: všechny vrtý otevřeny, odpor nastaven na $1 \text{ kg.m}^{-4}.\text{s}^{-1}$,
- odpor potrubí vrtů: $100 \text{ kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 1000 Pa,
- DKS: 1.

Průběh experimentu

Simulace probíhala mnohem pomaleji vzhledem k malému kroku simulace plynoucího z malého odporu vrtů. Od ukončení 5. minuty byly rozdíly v odsávaném množství vzhledem ke kontrolnímu experimentu do 1 % a postupně při ustalování proudění se zmenšovaly. Na začátku simulace se odsávalo několikanásobně větší množství ve srovnání s prvním kontrolním vrtem. Výsledný graf vývoje na skládce vypadal stejně jako v prvním experimentu.

Zhodnocení experimentu

Rozdíly v odsávaném množství jsou způsobeny rychlejším vyrovnáním tlakových rozdílů z důvodu několikanásobně nižšího odporu potrubí vrtů. Počáteční odsátí plynu z vrtu proběhlo během první minuty. Přestože byl odpor potrubí vrtů nastaven 40krát menší, jeho vliv byl významný pouze při skokové změně v otevření vrtu, ne však při ustalování průběhu.

Další experimenty

Dále byly zvoleny experimenty (viz tabulka 8.11) s následujícími společnými parametry:

- vzor skládky č.: 4,
- rozměr skládky: 50 x 100 x 6,
- počet elementů: 10 x 20 x 3,
- odpor izolační vrstvy: $10^{20} \text{ kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 4000 Pa,
- celkový vývin plynu: $40 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$,
- DKS: 1.

Tab. 8.11 Vliv odporu vrtů - vstupní parametry

Číslo exp.	DKS	Krok simulace [s]	Měrný odpor vrtů $[\text{kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}]$	Vrty
1	1	0,0399	1 000	4A
2	1	0,399	10 000	4A
3	10	0,00399	1 000	4A
4	10	0,0399	10 000	4A

Tab. 8.12 Vliv odporu vrtů - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % ods. množství

Číslo exp.	Odsávané množství $[\text{m}^3.\text{h}^{-1}]$	Čas [h]	Únik CH_4 $[\text{m}^3.\text{h}^{-1}]$	Sání $[\text{m}^3.\text{h}^{-1}]$	Odsávání v 1. min. $[\text{m}^3.\text{h}^{-1}]$
1	40,4	8,05	0	6,3E-10	249,37
2	40,4	8,1	0	6,1E-10	236,53
3	40,4	8,05	0	6,3E-10	249,36
4	40,4	8,1	0	6,1E-10	236,51

Dílčí zhodnocení

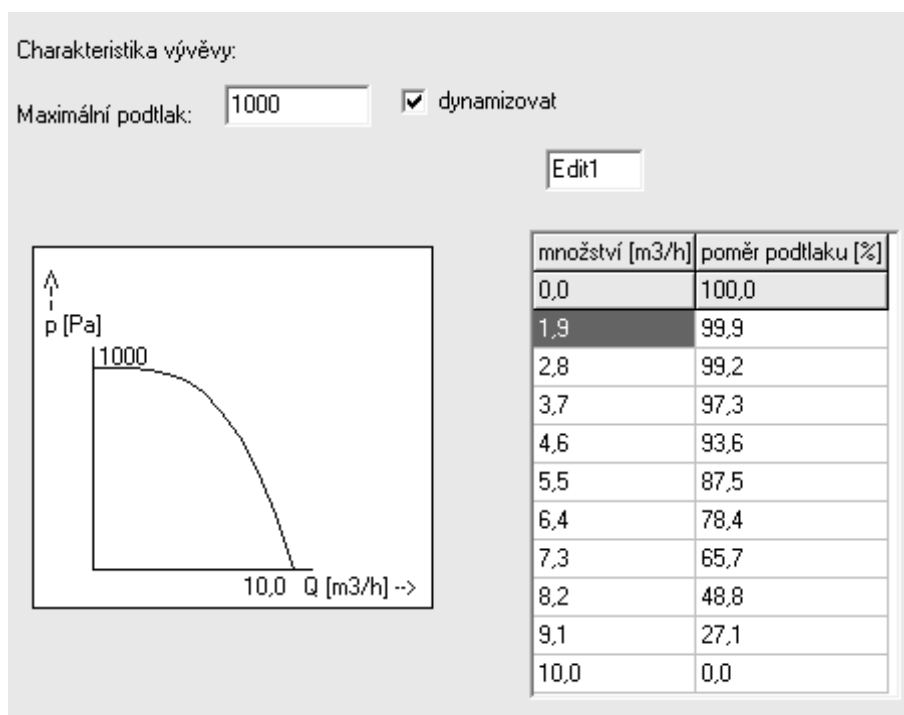
Z experimentů podle tabulky 8.12 vyplývá vliv odporu vrtů na průběh odsávání a sání vzduchu z okolí skládky. Doba ustálení byla o 0,6 % delší, sání o 3,2 % menší a průměrné odsávání v 1. minutě o 5 % menší. Tyto odchylky jsou nízké vzhledem k desetinásobnému zvýšení odporu vrtů.

8.6 Charakteristika vývěvy

V tomto experimentu je zjišťován vliv nastavení statické charakteristiky vývěvy. V úvodní části je opět využita skládka z prvního kontrolního experimentu. Pokles podtlaku vývěvy na 0 Pa byl záměrně nastaven na nízkou hodnotu.

Parametry experimentu

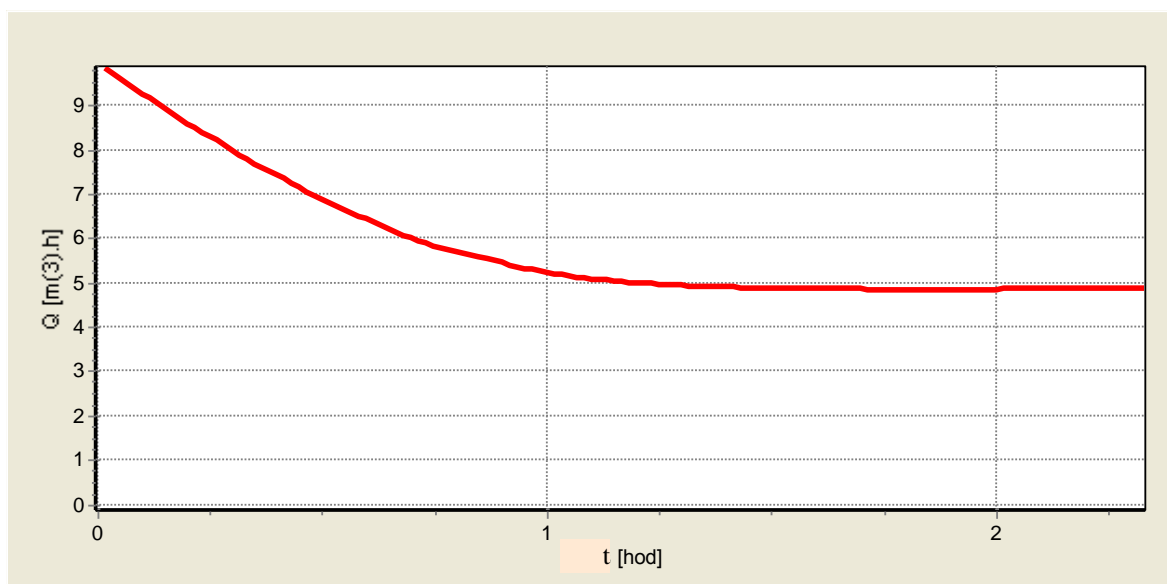
- uzavření vrtů: všechny vrty otevřeny, odpor nastaven na $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$,
- odpor potrubí vrtů: $4000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 1000 Pa, statická charakteristika viz obrázek 8.13
- DKS: 1.



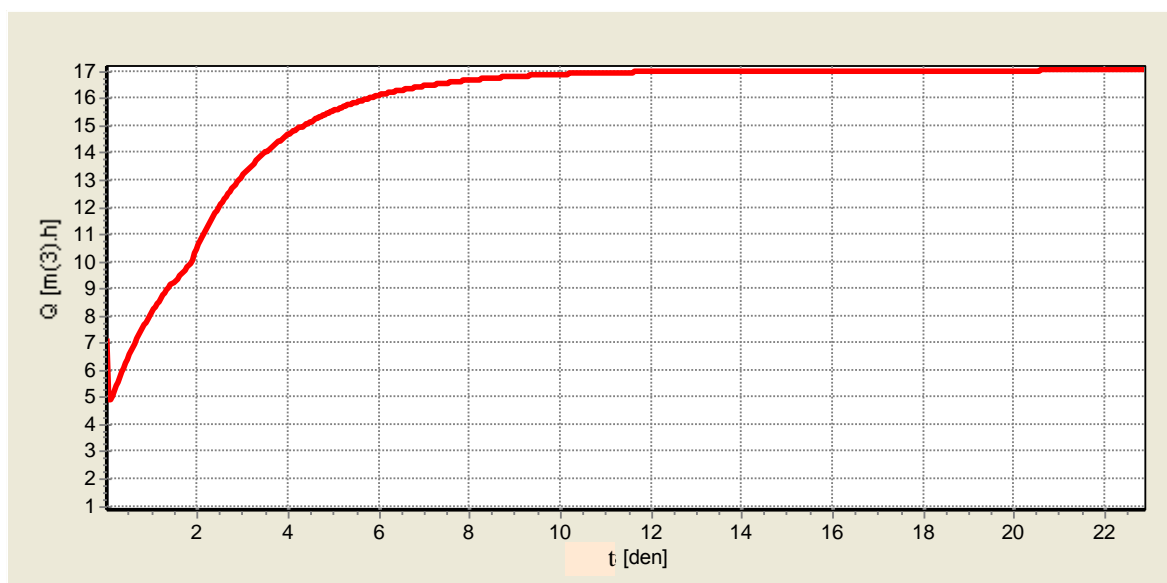
Obr. 8.13 Charakteristika vývěvy – úvodní experiment

Průběh experimentu

Odsátí plynu z vrtů probíhalo mnohem pomaleji (viz obrázek 8.14) než při konstantním podtlaku vývěvy (viz obrázek 8.5). Hodnoty 99 % celkového vývinu, tedy $16,85 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, je dosaženo za 9 dnů a 14 hodin (viz obrázek 8.15).



Obr. 8.14 Charakteristika vývěvy - množství, počátek



Obr. 8.15 Charakteristika vývěvy - množství

Zhodnocení experimentu

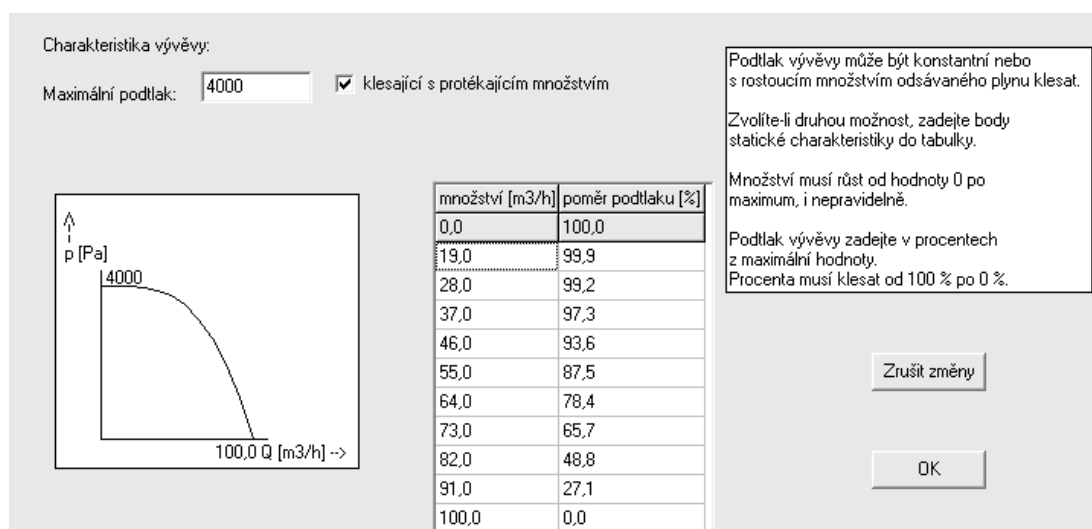
Nastavení statické charakteristiky v tomto případě způsobilo, že odsátí plynu z vrtů trvalo více než hodinu a ustálení na 99 % celkového vývinu trvalo o půl dne déle ve srovnání se stabilním podtlakem vývěvy.

Další experimenty

V dalších experimentech byl sledován vliv statické charakteristiky uvedené na obrázku 8.16.

Byly zvoleny experimenty (viz tabulka 8.13) s následujícími společnými parametry:

- vzor skládky č.: 4,
- rozměr skládky: 50 x 100 x 6,
- počet elementů: 10 x 20 x 3,
- měrný odpor vrtů R_{mv} : $10000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$,
- celkový vývin plynu: $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
- DKS: 1.



Obr. 8.16 Charakteristika vývěvy pro experimenty

Tab. 8.13 Charakteristika vývěvy - vstupní parametry

Číslo exp.	Krok simulace [s]	odpor izolační vrstvy [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$]	Podtlak vývěvy [Pa]	Konstantní podtlak	Vrty
1	0,399	10^{20}	2000	ano	2A
2	0,399	10^{20}	2000	ne	2A
3	0,399	10^{20}	4000	ano	4A
4	0,399	10^{20}	4000	ne	4A
5	0,399	10^{40}	4000	ano	4A
6	0,399	10^{40}	4000	ne	4A

Tab. 8.14 Charakteristika vývěvy - výsledné hodnoty, ustálení s odch. 1 % ods. množství

Číslo exp.	Odsávané množství [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Čas [h]	Únik CH_4 [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Sání [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Odsávání v 1. min. [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]
1	39,6	17,83	1,5E-04	0	59,37
2	39,6	18,55	1,5E-04	0	54,17
3	40,4	8,1	0	6,1E-10	236,53
4	40,4	8,42	0	5,3E-10	90,28
5	40,4	8,1	0	6,1E-30	236,53
6	40,4	9,47	0	5,4E-30	90,28

Dílčí zhodnocení

Při omezení podtlaku vývěvy dochází k plynulejšímu odsátí plynu z vrtu při spuštění simulace (obdobně po otevření vrtu), a tím i k prodloužení doby ustálení. Menší nasávané množství je důsledkem menšího podtlaku vývěvy při trvalém odsávání.

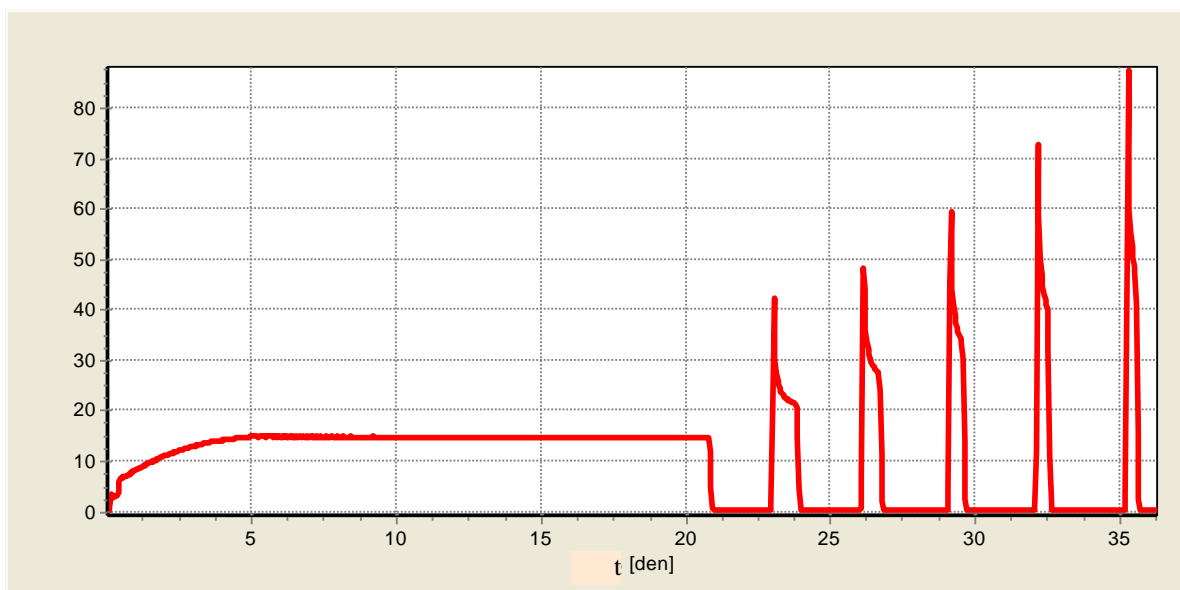
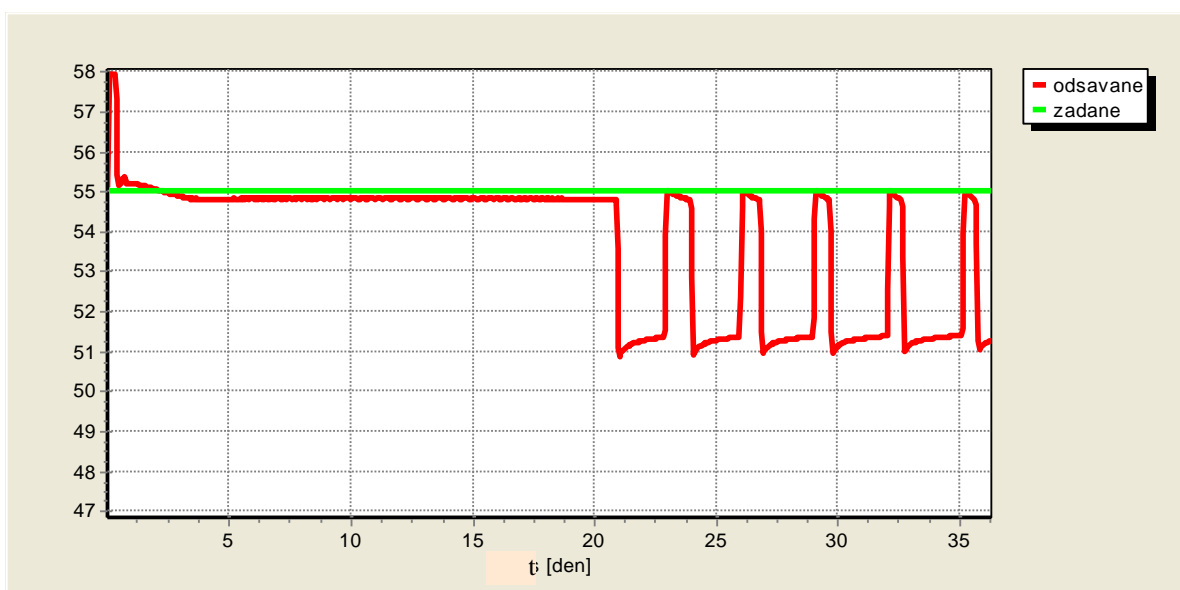
8.7 Maximalizace množství

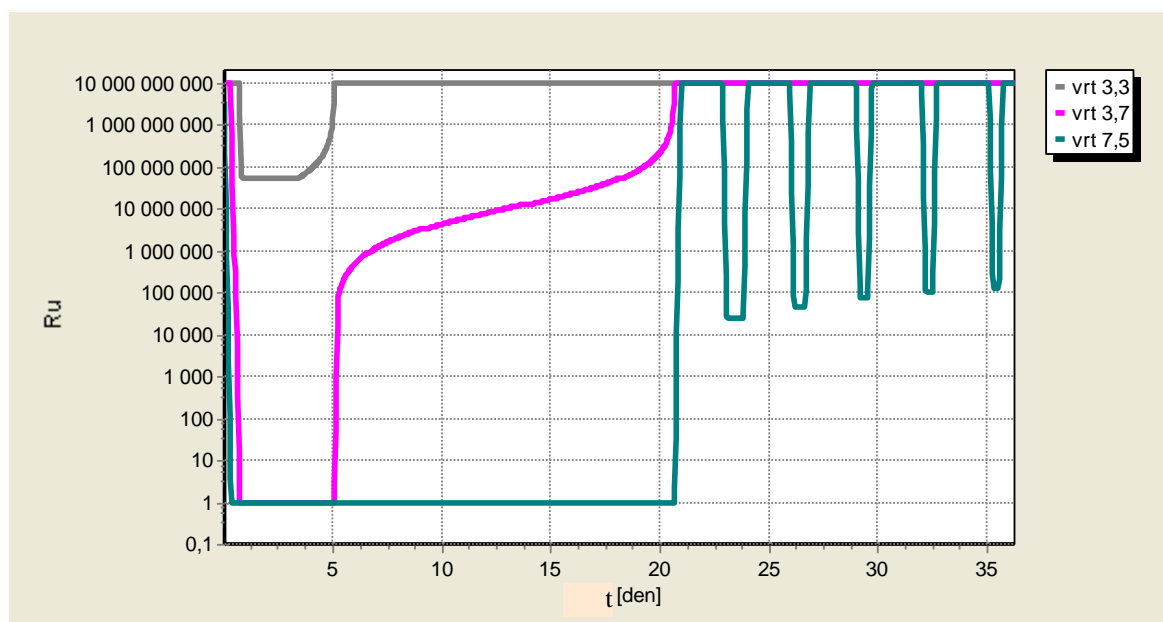
V tomto experimentu je použito řízení odsávání s maximalizací odsávaného množství a dodržení minimální koncentrace metanu.

Parametry experimentu

Řízení odsávání bylo provedeno pro s následujícími parametry:

- měrný odpor vrtů R_{mv} : $1000 \text{ kg.m}^{-5}.\text{s}^{-1}$,
- podtlak vývěvy: 1000 Pa ,
- cíl řízení: Maximalizace Q , dodržení C_{min} ,
- požadované C_{min} : 55 % , odchylka $0,2 \text{ %}$,
- krok řízení: 120 s ,
- škrcení: 10 % ,
- DKS: 1 .

Obr. 8.17 Graf řízení maximalizace Q , dodržení C_{\min} - množstvíObr. 8.18 Graf řízení maximalizace Q , dodržení C_{\min} - koncentrace

Obr. 8.19 Graf řízení maximalizace Q , dodržení C_{\min} - uzavření vrtů

Průběh experimentu

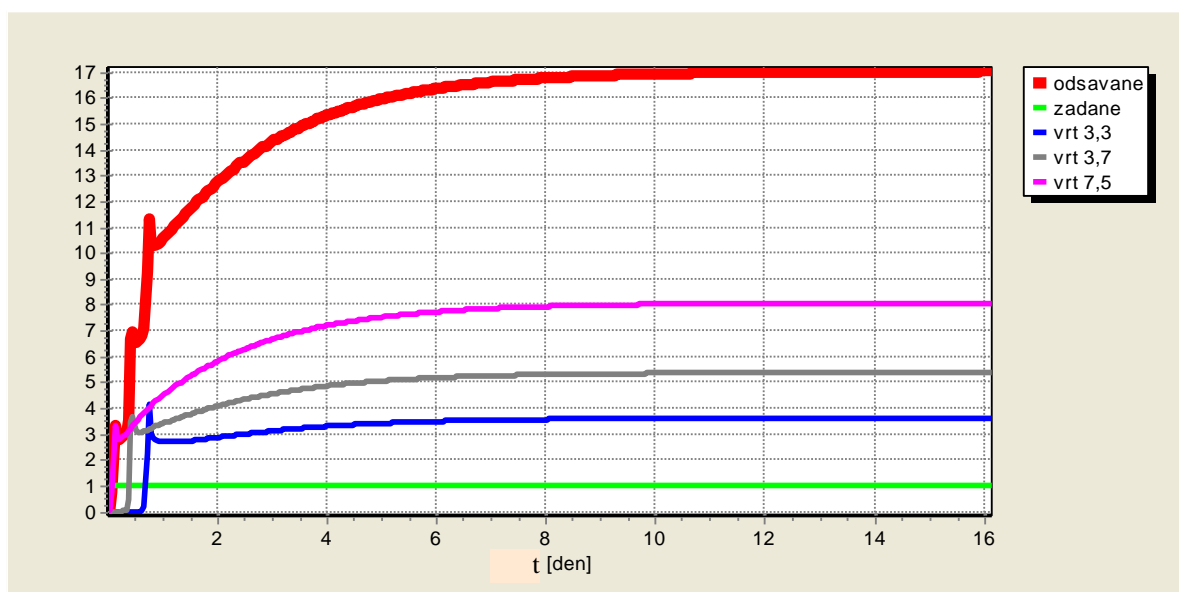
Po spuštění simulace došlo k postupnému otevírání všech vrtů (viz obrázek 8.19), počínaje vrtem s nejvyšší koncentrací. Vrt s nejnižší koncentrací se otevřel jen částečně a po 2 dnech a 20 hodinách byl uzavřen zcela, neboť koncentrace začala klesat pod rozmezí žádané minimální koncentrace metanu, jak ukazuje obrázek 8.18. Toto rozmezí je dáno požadovanou minimální koncentrací metanu C_{\min} a stanovenou odchylkou pro řízení, v tomto případě tedy rozmezí od 54,8 do 55,2 %.

Následovalo narůstání odsávaného množství (viz obrázek 8.17) a uzavírání vrtů z důvodu klesání koncentrace metanu. 12. den byly uzavřeny všechny vrty neboť došlo i u vrtu s nejvyšší koncentrací metanu k poklesu pod požadované minimální rozmezí. Uzavření vrtu s nejvyšší koncentrací způsobilo velký pokles koncentrace v odsávaném plynu, ale při minimálním odsávaném množství. Dostatečná koncentrace pro odsávání byla až 14. den a začalo se odsávat značné množství, čímž opět došlo k výraznému poklesu koncentrace v odsávaném vrtu a ten se opět uzavřel. Tento cyklus se pak neustále opakuje. Tento případ nastal při experimentování s požadovanou minimální koncentrací o 1,72 % vyšší než je

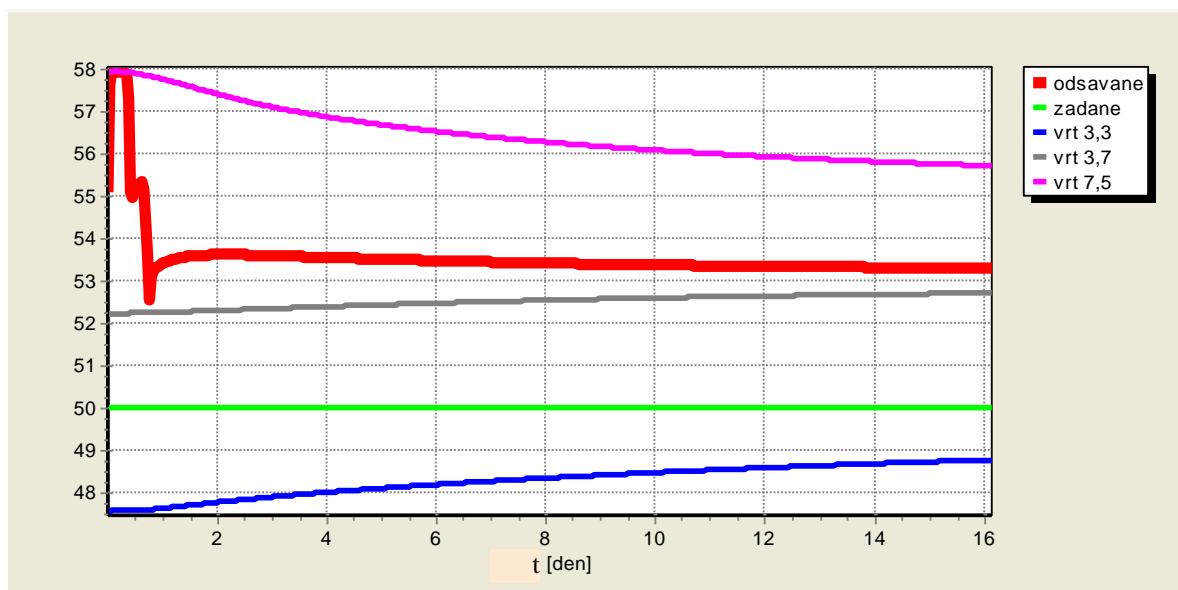
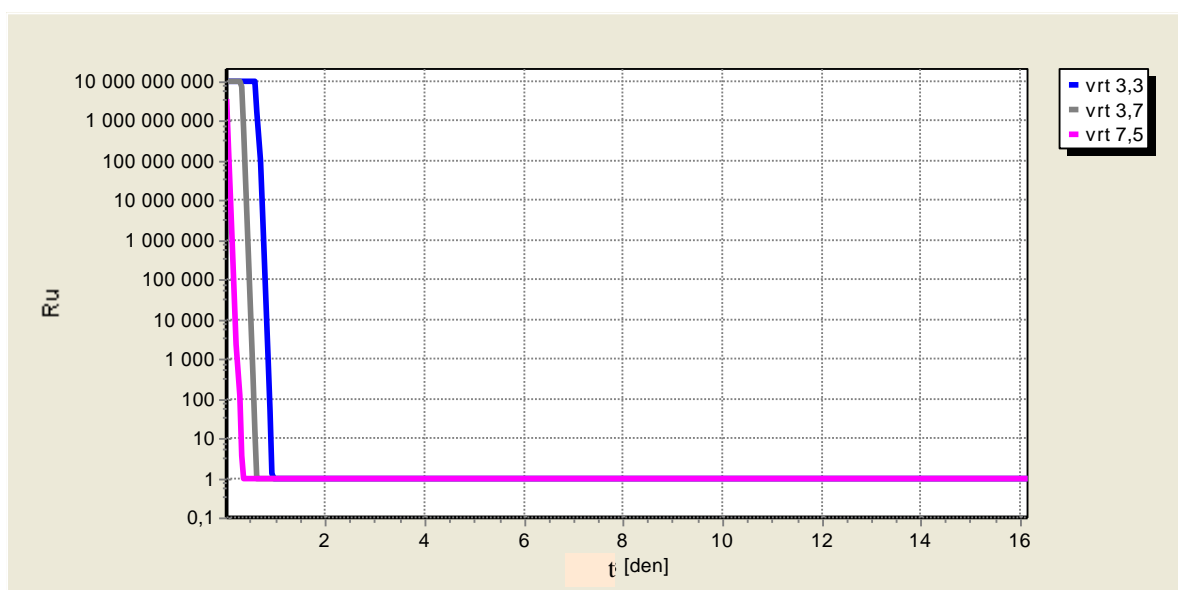
průměrná koncentrace plynu vyvíjejícího se na skládce. Proto byla v dalším pokusu nastavena požadovaná koncentrace 50 %.

Průběh 2. experimentu

Během prvního dne došlo k otevření všech tří vrtů (viz obrázek 8.22). Začalo se zvyšovat odsávané množství až do ustálení během 2. a 3. týdne, kdy se již odsávalo $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (viz obrázek 8.20). Koncentrace metanu se začala snižovat současně s otevíráním vrtů s nižší koncentrací a ustálila se na 53,3 % v 3. týdnu (viz obrázek 8.21).



Obr. 8.20 Graf řízení maximalizace Q, dodržení C_{\min} 2.experiment - množství

Obr. 8.21 Graf řízení maximalizace Q , dodržení C_{\min} 2.experiment - koncentraceObr. 8.22 Graf řízení maximalizace Q , dodržení C_{\min} 2.experiment – uzavření vrtů

Dílčí zhodnocení

V prvním experimentu došlo ke znemožnění odsávat v souladu s cílem řízení, protože v žádném vrtu nebyla dostatečná koncentrace podle požadovaných hodnot. Na tomto experimentu je vidět, jak důležité je dopředu odhadnout množství a složení skládkového plynu, aby došlo k bezproblémovému využití odsávaného plynu.

8.8 Závěr z experimentů

Na provedených experimentech bylo ověřeno, že vliv dělitele kroku simulace nemá znatelný vliv na odsávání, přestože únik metanu není ani po ustálení konstantní, ale kmitá v malém rozmezí v okolí ustálené hodnoty, jak bylo uvedeno v prvním experimentu. Toto rozmezí se zmenšuje zvyšováním dělitele kroku simulace. Dále bylo zjištěno, že počet elementů v jednotlivých osách skládky má velmi významný vliv na odsávání a proto i na případné závěry plynoucí z experimentů. Zvýšení počtu elementů a z toho plynoucího zpřesnění simulace je podmíněno významným zvýšením výkonu počítačového aparátu. Závěry ohledně optimálního počtu a rozložení vrtů jsou při tak nízkém počtu elementů nemyslitelné.

V experimentech bylo ověřováno, že vliv odporu potrubí je velmi malý. To je dáno jednak tím, že délka vrtu je několikanásobně kratší než délka skládky a jednak tím, že odpor vrtu je mnohonásobně menší než odpor odpadového materiálu. Tento malý vliv byl potvrzen, ale u tohoto ověřování však nebyl proveden dostatečný počet experimentů.

Bylo předpokládáno, že odpor materiálu má největší vliv na odsávání, a to také bylo potvrzeno v experimentech se zmenšením odporu materiálu na polovinu, kdy došlo ke změnám v rozsahu kolem 50 %.

9 Závěr

Ve své práci jsem se zabýval vznikáním, prouděním a odsáváním skládkového plynu z uloženého komunálního odpadu na skládkách. Pro tento účel jsem vytvořil matematický model proudění ve skládce a navrhl možnosti řízení těžby skládkového plynu. Tento model jsem následně využil k naprogramování aplikace Skládka, která umožňuje simulovat vývin a odsávání skládkového plynu v závislosti na zvoleném cíli řízení.

V úvodních teoretických kapitolách jsem se zabýval rozбором biologického rozkladu odpadu a uložením na skládce, stávajícími možnostmi modelování procesů na skládce a uvedl některé programy, které k tomu můžeme využít. V páté kapitole jsem se zabýval teoretickým rozбором proudění plynu skládkovým materiálem a uvedl možnosti získání parametrů potřebných pro simulaci. Tím jsem splnil 1. dílčí díl mé práce. V šesté kapitole jsem v rámci 5. dílčího cíle navrhl pět cílů pro řízení odsávání skládkového plynu a vypracoval algoritmy řízení pro počítačové zpracování. Uvedl jsem překážky, které by mohly nastat a znemožnit splnění cíle řízení. V sedmé kapitole jsem vytvořil vlastní model skládky s rozdělením na elementy s využitím metody konečných objemů, stanovil matematické vztahy a algoritmus výpočtu a představil aplikaci, kterou jsem na základě výše uvedeného vytvořil. Tím jsem splnil 2. a 3. dílčí cíl.

V poslední kapitole jsem podle 4. dílčího cíle provedl několik experimentů s programem Skládka, na kterých jsem předvedl možnosti programu a ověřil zpracovaný model skládky. Ověřil jsem vliv dělitele kroku simulace a počtu elementů na průběh odsávání a sledoval vliv odporu potrubí vrtů a statické charakteristiky vývěvy na výsledky simulace.

V experimentech s řízením odsávání jsem ověřil, že při odsávání se v některých případech nedá úspěšně odsávat s nastaveným cílem řízení a dochází například k neustálému přerušování odsávání z různých důvodů, jako je nedostatečná koncentrace metanu ve vrtech a tím potvrdil předběžný rozbor v šesté kapitole.

Program Skládka lze využít k experimentům a získání poznatků o rozmístění vrtů tak, aby nedocházelo ani k velkému úniku plynu ze skládky, ani k nasávání okolního vzduchu do tělesa skládky, neboť vzdušný kyslík by měl negativní dopad na vznik nežádoucích

chemických sloučenin a snížil by koncentraci metanu v odsávaném skládkovém plynu a tím i omezil možnosti jeho využití. Zjistil jsem, že k tomuto účelu by bylo velmi potřeba výkonný počítač, aby bylo možno rozdělit skládku na větší počet elementů.

Výsledky z experimentů jsem shrnul v podkapitole 8.8 Závěr z experimentů.

Přínosem mé práce je zkoumání nového přístupu k problematice modelování řízení odsávání skládkového plynu. Přínosem programu Skládka je možnost získat odborný odhad pro stanovení počtu a rozmístění vrtů a předpokládaného vývoje množství a koncentrace odsávaného plynu a tím i jeho možnosti využití. Ve srovnání s jinými přesnějšími programy jako Fluent má program Skládka výhodu ve snadném použití, kdy nejsou potřeba ani žádné větší znalosti o prodění plynu.

Conclusion

In my thesis I deal with landfill gas rising, flowing and exhaustion from municipal waste stored in landfills. I create the mathematical model of flowing in landfill and designed possibilities of landfill gas exhaustion control. This model I used to make an computer application called Landfill Simulation which makes possible of landfill gas rising and exhausting with selected control objectives.

In beginning theoretical chapters I deal with analysis of waste biological decomposition and waste storage in landfill and present possibilities of landfill process modeling and introduce some software applications which we can use. In fifth chapter I deal with teoretical analysis of landfill gas flowing throught waste substance and introduce possibilities of obtaining parameters necessary for simulation. This was 1. partial goal of thesis.

In sixth chapter I design five goals for landfill gas exhausting control and makes control algorithms for computer program. I introduce impediments which can arise and disable control objective. This was 5. partial goal. In seventh chapter I made landfill model with elements using Finite Volume Method and set mathematical formulas and algorithm of calculation and introduce application Landfill Simulation, which I made. There I fill 2. and 3. partial goal.

In last chapter I done some experiments in Landfill Simulation and try out model of landfill. I verify influence of simulation step divider and count of elements to exhausting behaviour and I observe pipe resistance influence and static characteristic to simulation results.

In exhaustion control I verify that in some case it is impossible to succes with control objective and for examle it happens to continuous interrupt of gas exhaustion for example because in landfill there is not sufficient concentration of methane. It acknowledges presumption in sixth chapter. Experiment was 4. partial goal.

Landfill Simulation is possible to use to experiments to obtain knowledge about bore holes lay-out to avoid high outflow of methane to atmosphere and mainly inflow to landfill. Air oxygen has negative influence to chemical process in landfills. I found out it is needed very efficient computer to divide landfill to more elements.

In chapter 8.8 Conclusion of experiments I recapitulated results from experiments.

The benefit of my thesis is new approach to modeling and control landfill gas exhaustion. The benefit of the program Landfill Simulation is the possibility of obtain skilled estimate for assesment bore holes count and lay-out and supposed progress of quantity and methane concentration of exhausted gas and possibilities of gas usage. The advantage of Landfill Simulation is simplicity in compared to perfect program like FLUENT and user not need knowledges about gas flow.

10 Seznam obrázků

Obr. 2.1	Graf postupného vývoje skladby skládkových plynů [Juchelková 2000].....	19
Obr. 3.1	Typy povrchových skládek: a) nadúrovňová b) svahová c) podzemní [Pjura 2008]	28
Obr. 4.1	Geologický model	34
Obr. 4.2	Geologický model – vrstva	34
Obr. 4.3	Grafická síť - výpočet sítě [Pončík 2002]	36
Obr. 4.4	Fluent – ukázka, proudění vrtem pod povrchem [Hummel]	38
Obr. 4.5	Vícevrstvá neuronová síť s jednou skrytou vrstvou [ŘEPKA a KEBO 2001]	39
Obr. 4.6	Surfer - rozložení tlakového pole v řezu skládkou [Pončík 2002].....	40
Obr. 5.1	Proměřování permeability skládky s odsávacím zařízením [Strakoš a Pončík]	41
Obr. 5.2	Uzavřená skládka připravená pro odsávání plynu [Strakoš a Pončík 2003].....	42
Obr. 5.3	Teoretický průběh vývinu plynu ve vícevrstvé skládce [Strakoš a Pončík 2003]	43
Obr. 6.1	Algoritmus řízení pro maximalizaci Q , dodržení C_{\min}	47
Obr. 6.2	Algoritmus řízení pro dodržení Q_{\min} , maximalizaci C	48
Obr. 6.3	Algoritmus řízení pro stabilizaci Q , maximalizaci C	49
Obr. 7.1	Rozdělení skládky na elementy s odsávacími vrty	54
Obr. 7.2	Úvodní okno programu	64
Obr. 7.3	Zobrazení průběhu simulace	65
Obr. 7.4	Zobrazení - informace o elementu při přesunu myši nad ním	66
Obr. 7.5	Zobrazení - informace o elementu po kliknutí na něj	66
Obr. 7.6	Řízení odsávání	68
Obr. 7.7	Ukázka grafu historie – množství	70
Obr. 7.8	Ukázka grafu historie - koncentrace	70
Obr. 7.9	Ukázka grafu historie - otevření vrtů	71
Obr. 7.10	Nastavení charakteristiky vývěvy	72

Obr. 7.11 Statická charakteristika rotačního lopatkového stroje [Strakoš 1996].....	73
Obr. 8.1 Vlastnosti materiálu č. 1 – 3.....	75
Obr. 8.2 Vlastnosti materiálu č. 4.....	77
Obr. 8.3 Vlastnosti materiálu č. 5.....	77
Obr. 8.4 Kontrolní experiment s ustálením - množství.....	80
Obr. 8.5 Kontrolní experiment s ustálením - množství, počátek.....	80
Obr. 8.6 Kontrolní experiment s ustálením - koncentrace metanu.....	81
Obr. 8.7 Kontrolní experiment s ustálením - tlakové pole po 24 hodinách	81
Obr. 8.8 Krok simulace – absolutní rozdíl množství.....	84
Obr. 8.9 Krok simulace – procentuální rozdíl množství	84
Obr. 8.10 Počet elementů - množství	88
Obr. 8.11 Počet elementů - koncentrace metanu.....	89
Obr. 8.12 Počet elementů - tlakové pole po 24 dnech.....	89
Obr. 8.13 Charakteristika vývěvy – úvodní experiment	97
Obr. 8.14 Charakteristika vývěvy - množství, počátek	98
Obr. 8.15 Charakteristika vývěvy - množství	98
Obr. 8.16 Charakteristika vývěvy pro experimenty	99
Obr. 8.17 Graf řízení maximalizace Q, dodržení C_{\min} - množství	102
Obr. 8.18 Graf řízení maximalizace Q, dodržení C_{\min} - koncentrace.....	102
Obr. 8.19 Graf řízení maximalizace Q, dodržení C_{\min} - uzavření vrtů.....	103
Obr. 8.20 Graf řízení maximalizace Q, dodržení C_{\min} 2.experiment - množství	104
Obr. 8.21 Graf řízení maximalizace Q, dodržení C_{\min} 2.experiment - koncentrace.....	105
Obr. 8.22 Graf řízení maximalizace Q, dodržení C_{\min} 2.experiment – uzavření vrtů	105

11 Seznam tabulek

Tab. 2.1 Produkce odpadů v členění dle OECD [Magistrát hl. m. Prahy 2005]	16
Tab. 2.2 Rozdělení skládek podle normy ČSN 83 8034	23
Tab. 6.1 Otevírání a zavírání vrtů v algoritmu stabilizace Q a C	50
Tab. 6.2 Otevírání a zavírání vrtů v algoritmu maximalizace Q a stabilizace C	51
Tab. 6.3 Nedosažení cíle řízení	52
Tab. 8.1 Vzor skládky č. 1	75
Tab. 8.2 Vzor skládky č. 2	76
Tab. 8.3 Vzor skládky č. 3	76
Tab. 8.4 Rozložení vrtů	78
Tab. 8.5 Vliv DKS - vstupní parametry	86
Tab. 8.6 Vliv DKS - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % odsávaného množství	86
Tab. 8.7 Vliv počtu elementů - vstupní parametry	90
Tab. 8.8 Vliv počtu elementů - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % ods. množství ..	91
Tab. 8.9 Vliv materiálu - vstupní parametry	93
Tab. 8.10 Vliv materiálu - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % ods. množství	93
Tab. 8.11 Vliv odporu vrtů - vstupní parametry	95
Tab. 8.12 Vliv odporu vrtů - výsledné hodnoty, ustálení s odchylkou 1 % ods. množství	95
Tab. 8.13 Charakteristika vývěvy - vstupní parametry	100
Tab. 8.14 Charakteristika vývěvy - výsledné hodnoty, ustálení s odch. 1 % ods. množství .	100

12 Seznam použité literatury

- [1] ALTMAN, V. & RŮŽIČKA, M. 1996. *Technologie a technika skládkového hospodářství*. Praha, 1996 ISBN 80-7078-355-9.
- [2] BIJO s. r. o. 1994. *Skládky a skládkování odpadů*. Sborník referátů ze semináře. Praha, 1994.
- [3] BOŽEK, F. & URBAN, R. & ZEMÁNEK, Z. 2003. *Recyklace*. 1. vyd. Pustiměř : MoraviaTisk, 2003. 238 s. ISBN 80-238-9919-8.
- [4] ČESKÝ EKOLOGICKÝ ÚSTAV. *Koncepce odpadového hospodářství ve Švýcarsku*. Praha : Český ekologický ústav. Zpracováno podle STEIGER, Urs: Umsetzung der Abfallkonzepte in der Schweiz. Baustoff Recycling + Deponietechnik, 1993, č. 6, s. 17 – 18.
- [5] ČSN 83 8034 *Skládkování odpadů - Odplynění skládek*. Praha : Český normalizační institut, prosinec 2000.
- [6] ČSN 83 8030 *Skládkování odpadů - Základní podmínky pro navrhování a výstavbu skládek*. Praha : Český normalizační institut, prosinec 2002. 12 s.
- [7] DOHÁNYOS, M. & ZÁBRANSKÁ, J. & JENÍČEK P. 1996. *Anaerobní technologie v ochraně životního prostředí*. Praha : VŠCHT v Praze, 1996. 172 s. ISBN 80-85368-90-0.
- [8] EKO-KOM, a.s. *Systém EKO-KOM. Jak systém funguje* [online]. [cit. 2009-07-12]. Dostupný z www: <URL: <http://www.ekokom.cz/scripts/detail.php?id=68>>
- [9] FAMIGLIETTI, N. *Porosity and permeability of sand, gravel & clay* [online]. [cit. 2009-05-15]. Dostupný z www: <URL: <http://www.seed.slb.com/v2/FAQView.cfm?ID=561>>
- [10] GOTTFRIED, J. & ŠENOVSKÝ, P. *Matematický model pro zásobník metanu*. Zpráva o výsledcích dosažených v rámci grantového úkolu č. 105/98/KO45.
- [11] GUTWALD, R. *Možnosti využití bioplynu ze skládky komunálního odpadu Celio,a.s.* Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2006. Diplomová práce.
- [12] GROLMUS, L. 2009. Množství vytríděného odpadu opět stoupl. *Odpady*, 2009, č. 6, s. 14. ISSN 1210-4922.
- [13] HERČÍK, M. 1997. *Životní prostředí (úvod do studia)*. Dotisk. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1997. 141 s. ISBN 80-7078-340-0.
- [14] HUMMEL, M. *Řešení proudění plynů v oblastech s ukončenou hornickou činností, zejména s využitím programu FLUENT*.
- [15] JEDLIČKOVÁ, A. 2003. *Využití skládkového plynu ze skládky Frýdek-Místek*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2003. Diplomová práce.
- [16] JUCHELKOVÁ, D. 2000. *Likvidace a využití odpadů*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2000. 76 s. ISBN 80-7078-747-3.
- [17] JUCHELKOVÁ, D. aj. 2004. *Odpady a jejich místo v lidském životě*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2004. 90 s. ISBN 80-248-0649-5.

- [18] KÁRA, J. 2009. Úprava bioplynu na kvalitu zemního plynu. *Biom.cz* [online]. 2009-08-19 [cit. 2009-08-22]. Dostupný z WWW: <URL: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/uprava-bioplynu-na-kvalitu-zemniho-plynu>>. ISSN 1801-2655.
- [19] KEBO, V. aj. 2003. *Výzkum modelu optimálního odplynění skládky vzhledem ke zdroji plynu a jeho následnému využití*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2003. Závěrečná zpráva dílčího úkolu č.5 GAČR 105/01/0311 - Optimalizace těžby a využití bioplynu ze skládek komunálního odpadu s minimalizací jeho úniku do atmosféry.
- [20] KOZUBKOVÁ, M., DRÁBKOVÁ, S. & ŠTÁVA, P. 1999. *Matematické modely nestlačitelného a stlačitelného proudění. Metoda konečných objemů*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1999. 114 s. ISBN 80-7078-709-0.
- [21] KURAŠ, M. aj. 2008. *Odpadové hospodářství*. 1. vyd. Chrudim : Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r. o., 2008. 144 s. ISBN 978-80-86832-34-0.
- [22] LANDRYOVÁ, L. & KEBO, V. 2002. *Řízení biologické degradace ve skládkách*. Ostrava : VŠB-TUO, 2002. 12 s. Dílčí závěrečná zpráva úkolu Grantové agentury České republiky 105/01/031.
- [23] MAGISTRÁT HL. M. PRAHY 2005. *Ročenka 2004 PRAHA – ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ* [online]. Praha : Magistrát hl. m. Prahy. [cit. 2009-03-12]. Dostupný z www: <URL: http://envis.praha-mesto.cz/rocenky/pr04_html/04_uvod.htm>
- [24] MANUÁL FLUENT. 2001. *Getting Started*. Lebanon : Fluent Incorporated, 2001. 133 s.
- [25] NÁTR, L. 2006. *Země jako skleník -- Proč se bát CO₂?* 1. vyd. Praha : Academia, 2006. 144 s. ISBN 80-200-1362-8.
- [26] NOVOTNÝ V., ČERVINKA J. *Optimalizace dopravních toků v nakládání s komunálním odpadem* [online]. [cit. 2009-06-22]. Dostupný z WWW: <URL: http://old.af.mendelu.cz/mendelnet2004/obsahy/enviro/novotny_v.pdf>.
- [27] PICHTEL, J. 2005. *Waste management practices - municipal, hazardous, and industrial*. Boca Raton : CRC, 2005. 659 s. ISBN 0-8493-3525-6.
- [28] PJURA, L. 2008. *Tuhý komunální odpad*. Ostrava : VŠB-TUO, 2008. Bakalářská práce.
- [29] *Program Graf_Sit* [online]. Ostrava : VŠB-TUO. [cit. 2009-03-12]. Dostupný z www: <URL: http://hgf.vsb.cz/grafsit/hlavni_stranka_ang.htm>
- [30] PONČÍK, J. 2002. *Modelování skládek domovního odpadu*. Diplomová práce, Ostrava : Fakulta hornicko-geologická, VŠB-TU Ostrava, 2002. 37 s.
- [31] PROKOP, P. & KOLASA, K. 1988. *Větrání hlubinných dolů – návody pro cvičení*. 2.vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1988. 133 s.
- [32] ŘEPKA, M. & KEBO, V. 2001. *Vytvoření modelu skládky pomocí vrstvené neuronové sítě*. Ostrava : VŠB - TUO., 2001. 27 s. Dílčí závěrečná zpráva úkolu Grantové agentury České republiky 105/01/031.
- [33] ŘEZÁČ, J. 2009. *Názory veřejnosti na využívání dřeva k získávání energie* [online]. 2009-06-17 [cit. 2009-06-22]. Dostupný z www: <URL:

- <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nazory-verejnosti-na-vyuzivani-dreva-k-ziskavani-energie>>. ISSN 1801-2655.
- [34] SCHULZ H. & EDER B. 2004. *Bioplyn v praxi*. 1. vyd. Ostrava : HEL, 2004. ISBN 80-86167-21-6. 168 s.
- [35] SLADKÝ, V. 2009. Přeměna organického odpadu na motorová paliva. *Biom.cz* [online]. 2009-08-24 [cit. 2009-08-25]. Dostupný z WWW: <URL: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/premena-organickeho-odpadu-na-motorova-paliva>>. ISSN 1801-2655.
- [36] STATUTÁRNÍ MĚSTO OSTRAVA. 2006. *Sborník o stavu prostředí v Ostravě*. Ostrava : Repronis, 2006. ISBN 80-7329-123-1.
- [37] STEJSKAL, B. 2009. *Návrh zemního bioreaktoru pro zpracování zbytkového BRKO* [online]. 2009-06-15 [cit. 2009-06-22]. Dostupný z www: <URL: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/navrh-zemniho-bioreaktoru-pro-zpracovani-zbytkoveho-brko>>. ISSN 1801-2655.
- [38] STRAKA, F. 2003. Anaerobní biomethanizace komunálních odpadů. *Biom.cz* [online]. 2003-06-18 [cit. 2009-06-22]. Dostupný z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-biomethanizace-komunalnich-odpadu>>. ISSN: 1801-2655.
- [39] STRAKA, F. 2005. Komunální odpady - anaerobní fermentace versus skládkování. *Biom.cz* [online]. 2005-08-24 [cit. 2009-06-22]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/komunalni-odpady-anaerobni-fermentace-versus-skladkovani>>. ISSN: 1801-2655.
- [40] STRAKA, F. aj. 2006. *Bioplyn*. 2. vyd. Praha : GAS s. r. o., 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.
- [41] STRAKOŠ, V. 1996. *Dispečerské řízení dolu*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1996. 106 s. ISBN 80-7078-310-9.
- [42] TECHSOFT ENGINEERING, spol. s r.o. *Program ANSYS FLUENT pro simulace proudění* [online]. [cit. 2009-03-12]. Dostupný z www: <URL: http://www.techsoft-eng.cz/sluzby/ansys_cfd/fluently>.
- [43] TRUNEČEK, T. 2001. *Využití teorie sítí k řešení výstupu plynu z utlumovaných dolů na povrch*. Ostrava, 2001. Doktorská disertační práce.
- [44] VÁŇA, J. 2002. Anaerobní digesce komunálních bioodpadů. *Biom.cz* [online]. 2002-09-25 [cit. 2008-08-25]. Dostupný z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-digesce-komunalnich-bioodpadu>>. ISSN: 1801-2655.
- [45] VILIAMSOVÁ, J. & MÁDR, V. 2004. Gas branched pipe network given by gas pressure and temperature at the beginning of the network and mass flow rates at the ends of the network. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní*, 2004, roč. 50, č. 1, s. 199 - 206. ISSN 1210-0471.
- [46] ZEŽULA, J. 2008. *Návrh optimalizace umístění vrtů pro jímání skládkového plynu na skládce TKO Frýdek-Místek*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2008. 75 s. Diplomová práce.

13 Seznam vlastních publikací doktoranda

- [1] KEBO, V. aj. 2003. *Výzkum modelu optimálního odplynění skládky vzhledem ke zdroji plynu a jeho následnému využití*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2003. Závěrečná zpráva dílčího úkolu č.5 GAČR 105/01/0311 - Optimalizace těžby a využití bioplynu ze skládek komunálního odpadu s minimalizací jeho úniku do atmosféry.
- [2] PONČÍK, J. 2004A. Program for simulation of Gas Exhaustion Control in Landfills, In *Proceedings of 2nd International Workshop on Earth Science and Technology*, Fukuoka (Japan) : Kyushu University, 2004, p. 325-331. ISBN 4-9902356-5-7.
- [3] PONČÍK, J. 2004B. Program pro simulaci proudění plynu v rozrušeném materiálu. *Proceedings of XXIX. Seminary ASR'04, Instruments and Control'04*, Ostrava, 2004, p.38, ISBN 80-248-0590-1.
- [4] PONČÍK, J. 2005. Programme for simulation of circulation of gas in unhinged material, *Journal of Cybernetics and Informatics*, Slovak Society for Cybernetics and Informatics, 2005, Available from World Wide Web: <<http://www.sski.sk/casopis/index.php>>.
- [5] STRAKOŠ, V. & PONČÍK J. 2003. Control of degazation of minitipal waste deposit, In *Proceedings of International Workshop on Earth Science and Technology*. Kyushu University, Fukuoka, Japan, 2003, s. 23-30.